

# ブライラ橋の建設工事報告 —東欧最長の長大吊橋建設—

海外事業委員会  
井谷達哉 村野文哉 柳博文

## 1. はじめに

ブライラ橋はルーマニア東部の主要都市であるブライラ市とドナウ川対岸のジジラ地区をつなぐ国道の一部で、ルーマニアを含む東欧では最長、EU域内では第3位の中央径間長(1,120m)の吊橋である。図-1-1に工事全体図、図-1-2に吊橋一般図、図-1-3に実施工程を示す。

2018年、吊橋を含む全長約23.4kmの国道建設工事がルーマニア道路インフラ公社からデザインビルド形式で発注され、日本およびイタリアの共同企業体(甲型JV)が受注した。日本の高い技術力およびデザインビルドの利点を最大限に活かし、構造形式や施工方法など品

質・工程・コストの最適化を図り設計および建設がおこなわれ、2023年7月、ブライラ橋が開通した。工事概要を以下に示す。

- 工事名 :ブライラ地区におけるドナウ川を跨ぐ吊橋の設計および施工
- 発注者 :CNAIR(ルーマニア道路インフラ公社)
- エンジニア :Metroul 社・Italrom Indinerie Internationala 社・Pegaso Ingineria 社・Arex Lider Company 社の4社JV
- 請負者 :Webuild-IHI インフラシステムJV
- 施工箇所 :ルーマニア・ブライラ県トウルチャ県
- 適用基準 :ユーロコード, ルーマニア基準, 他

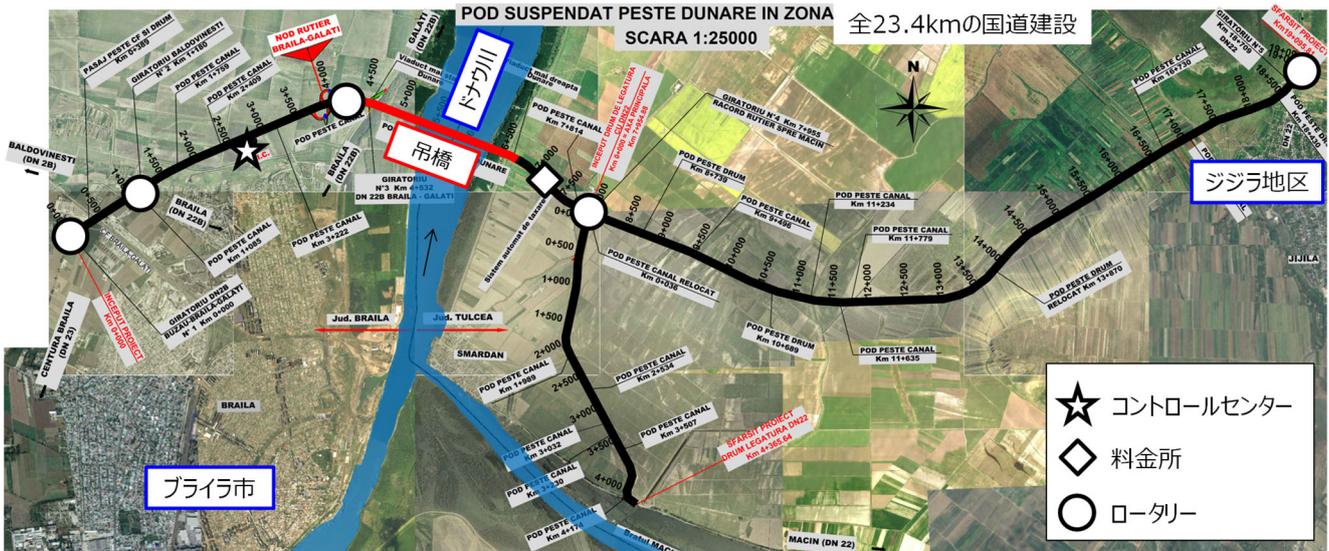


図-1-1 プロジェクト全体図

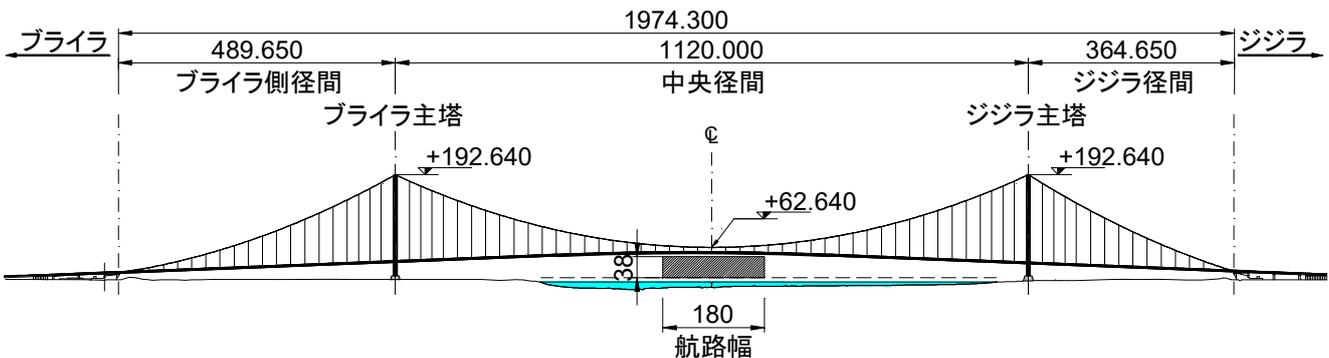


図-1-2 吊橋一般図

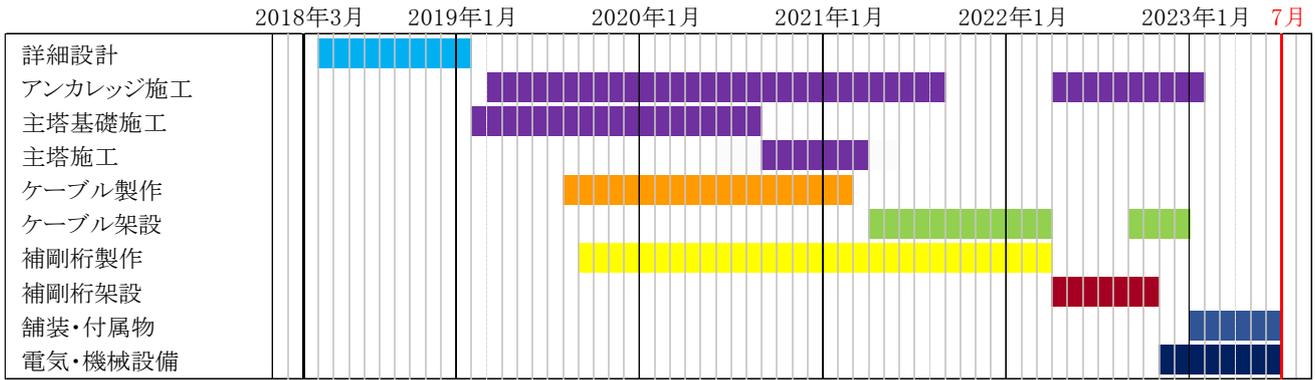


図-1-3 実施工程

施工工種 : 鋼 3 径間連続吊橋

長さ 6km の片側 2 車線の国道  
 長さ 15km の片側 1 車線の国道  
 道路管理事務所・料金所  
 その他、鋼橋・PC 橋・カルバートや、道路  
 運営に必要な全ての電気・機械設備を含  
 む

橋長 : 1,974.3m  
 支間長 : 489.650m + 1,120.000m + 364.650m  
 幅員 : 31.7m(桁幅), 片側 2 車線  
 鋼重 : 21,000ton(吊橋補剛桁)  
 ケーブル重量 : 7,200ton(メインケーブル・ハンガー)  
 コンクリート体積 : 200,000m<sup>3</sup>(アンカレッジ・主塔)  
 契約金額 : 20 億ルーマニアレイ(契約当時約  
 550 億円)うち 75%は EU ファンド

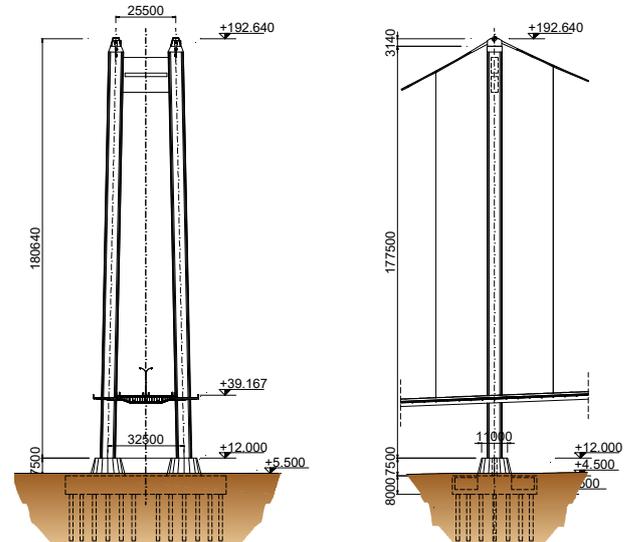


図-2-1 主塔一般図

国内では 2008 年の豊島大橋の完成以降、長大吊橋の建設事例はなく、日本の吊橋の建設技術をいかに継承・発展させていくかが課題となっている。そこで本報告では、国道建設工事のうち吊橋建設に焦点をあて、中でも特徴的な工種である、

- ①スリップフォーム工法による主塔の施工
  - ②エアスピニング工法によるメインケーブルの架設
  - ③マルチストランドジャッキによる補剛桁の架設
- について述べる。

## 2. 主塔の施工

### 2. 1 主塔の構造概要

本橋の主塔は、塔柱台座高さ+12.000m から塔頂サド

ル底面+189.500m まで、高さ 177.5m のコンクリート製である(図-2-1)。外寸 6.5m×6.5m の正方形断面を有する塔柱が、基部で 32.5m、塔頂で 25.5m の間隔となるよう鉛直方向に約 1.1 度(2%)傾斜し、塔頂部で 2 基の水平梁にて繋がれた形状となっている。耐風安定性向上のため、塔柱断面は四隅に半径 500mm のフィレットを有する(図-2-2)。壁厚は高さ方向に 4 段階、塔柱内側形状を変化させることで、構造上の最適化と外観上の一体感を両立している(表-2-1)。

塔頂の水平梁は 2 基合わせた構造となっており、それぞれ幅 3.5m×高さ 6.75m、壁厚 0.5m の矩形断面である。

## 2. 2 主塔の施工概要

一般的に塔柱のようなスレンダーな高層コンクリート構造物の施工にはジャンピングフォーム工法とスリップフォーム工法の2通りが考えられるが、本工事ではスリップフォーム工法を採用した。ジャンピングフォーム工法とは、型枠設置のための足場設備を何らかの方法でコンクリート躯体に固定し、そこから型枠の付け外しを行い、ジャッキを使用し段階的に上昇(ジャンプ)していく工法である。スリップフォーム工法とはコンクリートの型枠(フォーム)をジャッキで押し上げ、滑らせて(スリップ)上昇させながら連続的にコンクリート打設と鉄筋配置を繰り返していくことで躯体

表-2-1 高さによる壁厚の変化

高さ [m]	壁厚 [mm]
+187.000 ~ +189.500	充実断面
+157.000 ~ +187.000	800
+62.000 ~ +157.000	1,000
+43.000 ~ +62.000	1,250
+14.000 ~ +43.000	1,450
+12.000 ~ +14.000	充実断面

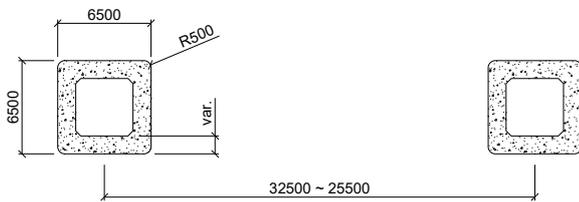


図-2-2 主塔 塔柱断面

を構築する工法である。この施工方法はコールドジョイントを低減できるため品質向上に寄与し、24時間施工が可能であり、型枠の付け外しがサイクル工程に入らないため工程短縮が可能となる。

塔柱台座コンクリートの施工と並行してスリップフォームの設備準備工が2020年6月からブライラ側で、7月からジジラ側で始められた。その後、9月にスリップフォーム工法による塔柱施工を開始、12月にはブライラ側塔柱の施工完了、ジジラ側はクリスマス休暇等を挟んで2021年1月に塔柱の施工を完了した。

塔頂水平梁は塔柱の施工と並行して地上であらかじめ製作され、2021年1月から3月の間に吊上げ、塔柱との接続を完了、3月から4月にかけて残りの塔頂周りのコンクリート打設を終え、ケーブル架設工事を開始した。主塔施工ステップを図-2-3に示す。

## 2. 3 コンクリートの配合設計

スリップフォーム工法では、24時間連続で型枠せり上げ・鉄筋配置・コンクリート打設が行われるため、その施工状態に沿った性質を持つコンクリートが求められる。コンクリート配合設計に関してスリップフォーム設備の供給業者およびコンクリート供給業者と様々な検討を行い、施工性を考慮した配合設計を行った。

### (1) 設計基準強度

設計基準強度 C50/60 が要求されたが、ルーマニアではあまり多く使用されていない高強度コンクリート

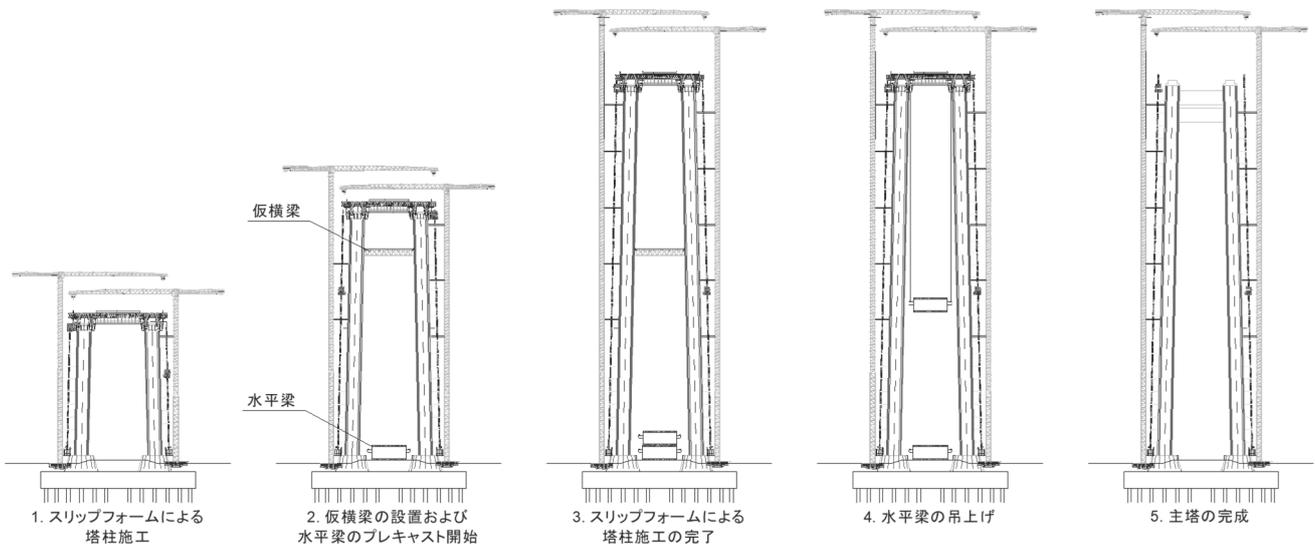


図-2-3 主塔施工ステップ

であるため、ルーマニアで入手しやすい材料をベースに配合設計を行った。(注：EN(ヨーロッパ基準)のコンクリート強度表記は Caa/bb であり、それぞれ aa：円柱供試体強度、bb：立方供試体強度を表し、単位は N/mm<sup>2</sup> である)

## (2) 凝結時間の調整

スリップフォーム工法の施工においては、スリップフォーム上のスペースが狭いことから多くの作業員を配置できず、鉄筋の間配り・鉄筋の設置にかかる時間がクリティカルになる。そこから1日あたり最大上昇量を約 2.5m とし、コンクリート凝結時間の検討を行った。ジャッキによる作業工程も考慮し、基本となる凝結時間を7~8時間に設定した。さらに、コンクリートの輸送時におけるトラブル、鉄筋設置の時間超過、季節ごとの気温の変化、などを考慮し、表面凝結遅延剤の量を調整することで凝結時間を調整し、最大15~16時間まで対応できるように、試験練りを繰り返しコンクリート配合の確立を図った。ひび割れ対策として低水和熱セメントの使用や、夏場は練り混ぜ水に冷水を使う等の対策を行っている。

実施工に際しては、昼夜の温度差による凝結時間の違いなどを考慮し、都度、打設状況を見ながら現場で



写真-2-1 スリップフォーム施工中

配合調整などの対応をした。写真-2-1にスリップフォーム施工中の状況を示す。

## 2. 4 スリップフォーム構造

スリップフォームの構造は、図-2-4に示すとおり3段の作業足場からなっている。下段足場は型枠下面から約 1.5m 程度下に設けられ、打設完了後のコンクリート養生や表面の補修、仮設エレベータへの乗降に用いられる。中段足場は型枠上面と同じ高さに設けられ、スリップフォーム(ジャッキ)の操作、水平鉄筋の組み立て、コンクリート打設、箱抜き等の設置等が行われる。上段足場は縦鉄筋の挿入や、コンクリートの打設に使用される。また、中段足場および上段足場は塔柱間でつながっており、作業員の行き来が可能となっている。

## 2. 5 水平梁の施工

水平梁は塔頂部に上下2基並ぶように配置されているため、施工方法について懸念があった。詳細設計における検討の結果、短工期を達成しつつコストを抑える案として、上下ともプレキャストRC製とし、1基ずつ吊上げ架設で進めることに決定した(写真-2-2)。

水平梁は架設機材・後打設部の鉄筋等含めて1基あたり約 450ton あり、吊上げには 80ton マルチストランドジャッキを片側4基の計8基用いた。塔頂の1カ

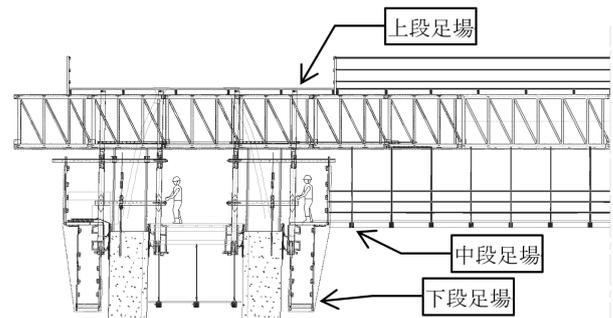


図-2-4 スリップフォーム

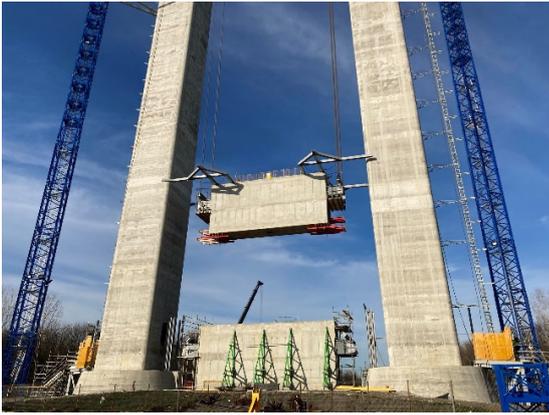


写真-2-2 水平梁の地上製作および吊上げ状況

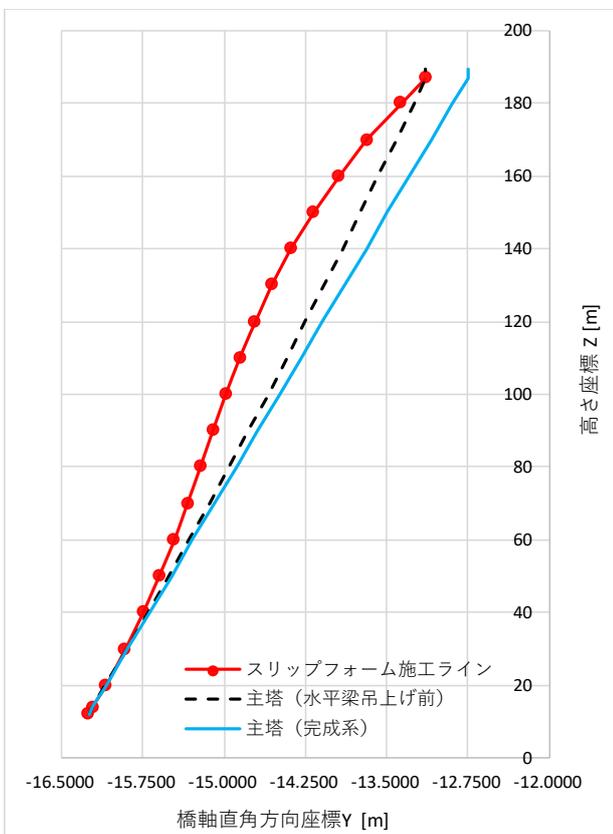


図-2-5 スリップフォームの施工狙い値

所で荷重制御による集中管理とし、不均等吊上げ防止のため、水平梁上に設置した水位計で傾きをモニター確認しながらの吊上げとした。

吊上げ完了後、塔柱に埋め込んだベースプレートと水平梁に設置した鋼製梁とを溶接し、仮固定を行った(写真-2-3)。その後、塔柱および水平梁にあらかじめ埋め込んだカップラーに鉄筋を設置し、重ね継手としてコンクリート打設することで塔柱と水平梁の本固定を行った。

## 2.6 出来形管理

主塔は図-2-1 に示すとおり塔柱が幅員中心に向かって傾いている構造であるため、塔柱施工中にはその自重による幅員内側への倒れが生じる。完成時に設計想定どおりの形状を達成するためには、この自重による倒れの影響を無くすことが必要である。そこで、FEM 解析を行い塔柱完成時における主塔の出来形(計画値)を求めた。本主塔は中間水平梁が無く、上部でのみ両塔柱が接合される構造であるため、この設計値どおりの施工を行うにあたり、次の3通りの方法が考えられた。

- ① あらかじめ幅員外側にオフセットしたラインを狙い値とし、自重による倒れが生じた段階で設計形状となるように施工する方法
- ② 設計形状を狙い値とし、中段に仮横梁を設置し、油圧ジャッキ等で自重による倒れ分を解消し、設計形状となるように施工する方法
- ③ ②と同様に設計形状を狙い値とするが、施工の進捗に伴い、仮横梁を順次、数段設置し、自重による倒れを無視できるほど小さくするように施工する方法

①の場合、主塔基部付加曲げモーメントが生じるため、その耐力照査を行い、必要あれば追加の鉄筋を配置することが必要となる。一方、②・③の場合は仮横梁およびジャッキ等のシステム導入が必要となる。ここでは作業性・施工の安全性等の観点から、①案を採用した上で塔柱基部に鉄筋を追加することで進めることとした。

あらかじめオフセットしたラインを狙い値とし、自重による倒れを許容して施工していくことから、施工時の狙い値

の設定が必要であった。そこで図-2-5 に示すように、主塔(完成系)ラインに対して、スリップフォーム施工ラインを設定し、各高さにおける橋直方向の位置を算出し、スリップフォームの狙い値として施工を行った。

施工中は、①鉛直レーザーによる相対計測、②トータルステーションによる計測の2種類の方法でスリップフォームの施工精度を確保した。①については、1主塔当たり10カ所の鉛直レーザーを地上に設置し、それをスリップフォーム上のターゲット(写真-2-4)で受けることで、相対的な位置変化を追いかけた。

②については、ブライラ側3カ所、ジジラ側2カ所(ドナウ川が近く地形上の制約で少ない)の地上の基準点を参照してトータルステーションを設置し、毎日スリップフォームの型枠下端もしくはオフセットした高さの座標を計測した。断面内では、各塔柱の3辺ないし2辺のそれぞれ2点ずつの座標および各辺の長さを計測し、断面中心の位置、各辺の出入り(回転)、高さ、塔柱間隔を求めた。

表-2-2 にそれぞれの塔柱完成時における橋軸方向、橋軸直角方向の実測結果と出来形許容値を示す。なお、許容値はタワーサドル位置での要求値である。タワーサドル設置時にある程度調整可能であるが、この調整が不要となるほど精度よく施工を完了することができた。最終出来形は、橋軸方向・橋軸直角方向とも許容値内で精度良く施工されていることを確認した。写真-2-5 に主塔完成時の状況を示す。

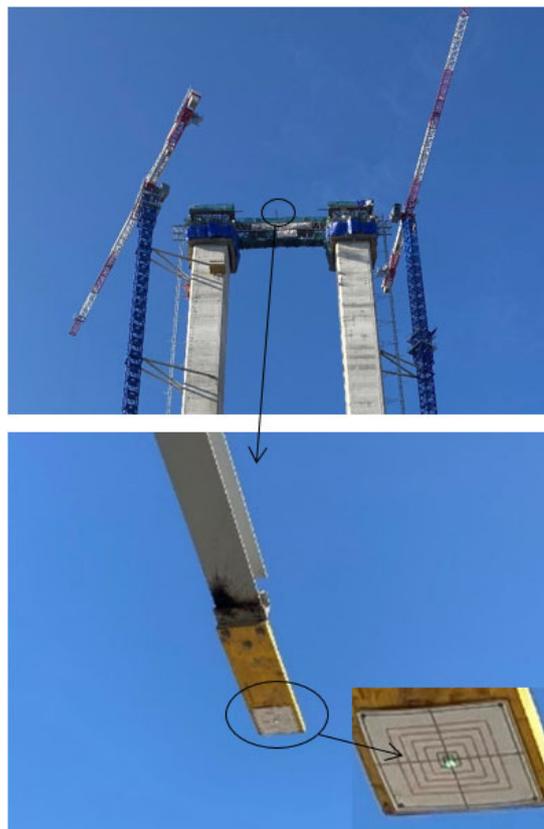


写真-2-4 スリップフォーム上のレーザーターゲット

表-2-2 塔柱施工最終出来形許容値

		橋軸	橋軸直角
ブライラ側	北塔柱	1/35,800	1/24,500
	南塔柱	1/15,600	1/17,200
ジジラ側	北塔柱	1/28,700	1/5,900
	南塔柱	1/43,000	1/11,500
設計許容値(サドル位置)		1/2,000	1/2,000

### 3. メインケーブル架設

吊橋のケーブル架設では図-3-1 に示すように複数の工種が含まれるが、ここでは後述する低張力エアスピニング工法(以下、AS工法)によるストランド架設について述べる。

#### 3. 1 ケーブル諸元

表-3-1 にケーブル諸元を示す。ケーブルは引張強度  $f_u=1,860\text{MPa}$ 、直径  $5.38\text{mm}$  の亜鉛めっき素線で構成されており、1ストランドあたりの素線本数は544本である。図-3-2 に示すように、側径間ではストランドを2本追加している。ケーブル直径は約  $570\text{mm}$ 、全体重量は  $6,775\text{ton}$  である。亜鉛めっき素線は日本で全量製作し、 $2\text{ton}$  毎にコイル化して現地へ輸送した。



写真-2-5 主塔完成時の状況



図-3-1 ケーブル架設工程概要

### 3. 2 タワーサドルのセットバック

ケーブル架設時、ケーブル以外の構造物死荷重が載荷されていないため、主塔が鉛直状態でケーブルを架設すると、完成時の側径間と中央径間の張力差により主塔に過大な曲げモーメントが発生する恐れがある。そのため、鋼製主塔吊橋の場合、キャットウォークロープ等で主塔を側径間側に引き込み、ケーブル架設前に主塔を傾けておくこと(セットバック)が一般的である。しかし、本橋はコンクリート主塔のため、主塔そのものをセットバックさせると、主塔基部に発生する大きな曲げモーメントによるひび割れが生じる。そこで、本橋では図-3-3に示すように、塔頂部にスタッド付きの鋼板(ベースプレート)を設置し、そのベースプレート上でタワーサドルを滑らせることで、主塔基部の曲げモーメントを低減させることとした。

セットフォワード作業には、1,000tonの油圧ジャッキを2台使用し、ケーブル架設後のタワーサドルとベースプレート間の接地面摩擦力に対して、約40%の余裕をもたせた。

油圧ジャッキの選定にあたり、鋼板どうしの摩擦係数として0.40を見込んだが、現地施工時に低摩擦状態を実現するため、ベースプレート上にグリース(潤滑

表-3-1 ケーブル諸元

	ブライラ 側径間	中央 径間	ジジラ 側径間
素線数(本)	9,008	8,704	9,264
ストランド数(本)	16+2	16	16+2
ケーブル径(mm)	571	561	579

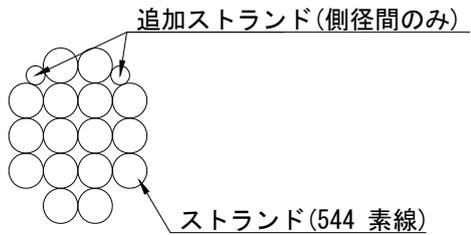


図-3-2 コンパクション前のストランド配置・構成

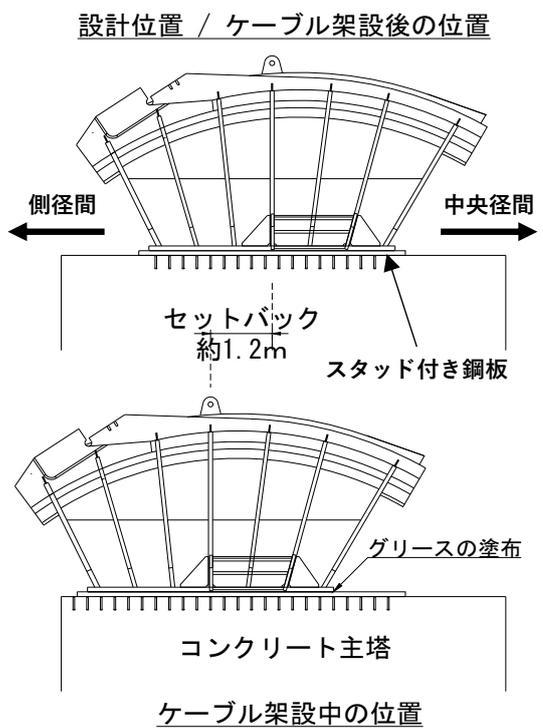


図-3-3 タワーサドルのセットバック

剤)を塗布することとした。下記の3点に着目し、製鉄所の軸受など高荷重下での使用実績のある、有機モリブデンが配合されたグリースを採用した。

- ・耐高荷重性
- ・氷点下における流動性
- ・屋外環境下での防錆性能

### 3. 3 ケーブルの定着構造

供用時における1ケーブルあたりの死荷重張力は約160,000kN、1ストランドあたりでも約10,000kNの力が作用する。そのため、ストランドシューによりストランド単位で定着することでアンカレッジに作用する力を分散させている。定着部は、アンカレッジの躯体前面に設置したクロスヘッドスラブに2本のテンションロッド、およびストランドシューを介してメインケーブルの張力を伝える構造である(写真-3-1)。写真-3-2に示すように、ストランドシューは、テンションロッドとシュー本体を専用治具で一体化した状態で移動式クレーンにて架設した。ストランドシューの据付精度は、レーザーポインターとターゲットプレートを用いて管理した(写真-3-3)。

### 3. 4 エアスピニング工法

吊橋のケーブル架設では、一般的にPPWS(Prefabricated Parallel Wire Strand)工法とAS工法が使い分けられる。本橋では、規模や施工条件等を考慮してAS工法を採用した。

AS全体の模式図を図-3-4、アンカレッジ背面に配置したAS機材配置(ASヤード)の全景を写真-3-4に示す。AS工法は、素線を1本ずつ引き出し、ある程度の本数を束にして現地でストランドに収束する工法である。そのため、現地でコイルから素線を解き出してリーリング/アンリーリングウインチ(U/Rウインチ)ドラムに巻き取る作業(リーリング作業)と、U/Rウインチドラムから一定張力を保ちつつ素線を送り出す作業(アンリーリング作業)が必要となる。リーリングおよびアンリーリング作業を安定して行うことは工程短縮およびケーブルの品質に大きく寄与するため、本工



写真-3-1 素線定着部 ストランドシュー



写真-3-2 ストランドシュー据付の様子

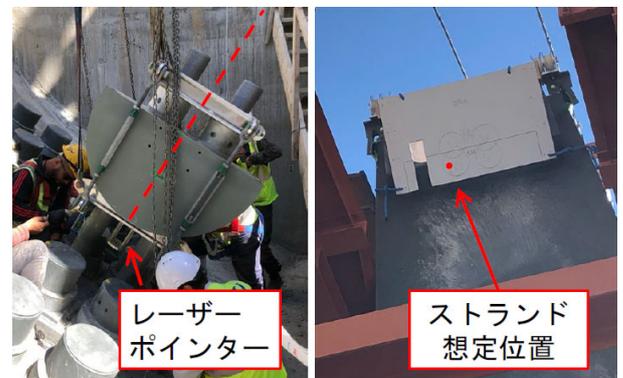


写真-3-3 ストランドシューの据付精度管理

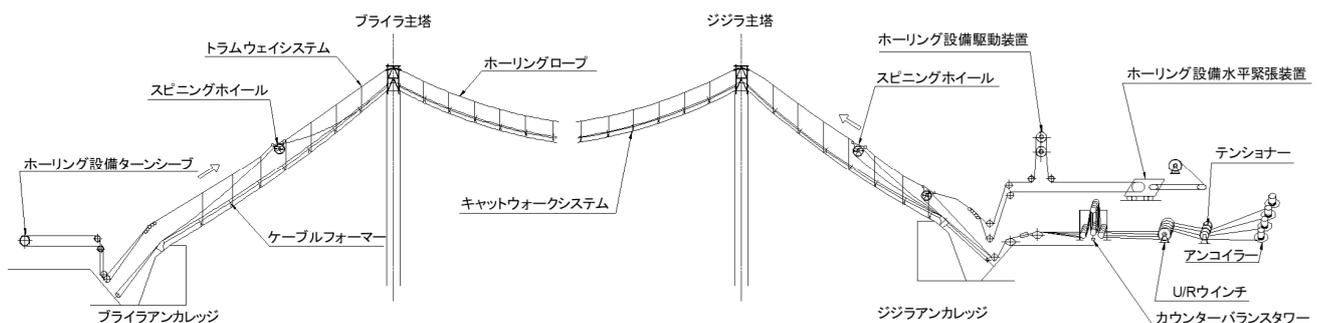


図-3-4 AS全体の模式図

事では、下記に示す新規開発の制御/運転システムを採用した。

リーリング設備は、素線コイルを設置するアンコイラー、解き出す素線の張力調整を担うテンショナー、U/R ウインチで構成される(写真-3-5)。リーリング作業は、操作盤でリーリング速度を設定し、テンショナーで検出した素線の通過速度をもとに、アンコイラーと U/R ウインチ双方の回転速度を調整する制御/運転システムを導入した。アンコイラーは上方巻解きかつ駆動式(回転速度制御)とすることで、アンコイラー部で張力が発生することを防ぎ、過去の工事で課題となったコイル内での素線の食い込みによる作業停止および素線の損傷がなくなり、安定したリーリング作業を実現した。U/R ウインチドラムのワイヤ巻き取り容量は約 10ton(5 コイル分)で、コイル間の素線端どうしはジョイントスリーブを用いて継線した。

アンリーリング設備は、素線を供給する U/R ウインチ、素線に一定張力をあたえるためのカウンターバランスタワー、素線を引き出すスピニングホイール、供給される素線を転向させる各種シーブで構成される。アンリーリング作業は、操作室で入力した速度情報をもとに、U/R ウインチ、ホーリング設備の駆動装置を連動させた。また、カウンターバランスタワーに設置したセンサーでフローティングシーブの位置を検知し、U/R ウインチの回転速度を調整することで、安定したアンリーリング作業を可能とした。

キャットウォーク上空にホーリング設備を設け、アンリーリング作業で送り出される素線をスピニングホイールで引き出し、兩岸のアンカレッジ間を往来させることでケーブルを架設した。写真-3-6 にスピニングホイールによる素線引き出し状況を示す。

本工事では、素線を設計張力より低い張力(185-200kgf)で引き出し、ケーブルフォーマー(写真-3-7)を介してキャットウォークに素線重量の一部を負担させながら架設する「低張力工法」を採用した。素線を1本ずつ目標張力で架設するフリーハング工法に比べ、低張力工法ではケーブルフォーマー上に素線を並べるため風の影響を受けづらく、素線どうしが絡まることを抑えることができる。また、素線の引き出し張力が比較的低いいため、設備能力を抑えることもできる。



写真-3-4 ASヤード



写真-3-5 リーリング設備

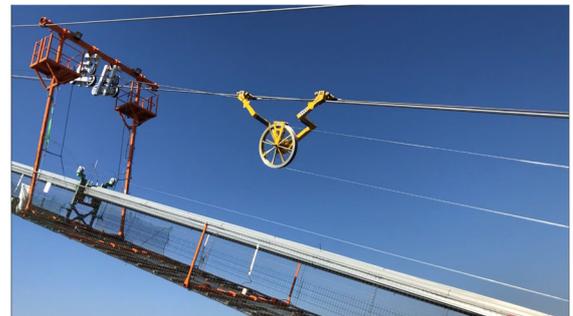


写真-3-6 スピニングホイールによる素線引き出し



写真-3-7 ケーブルフォーマー

低張力工法では、ケーブル架設進行に伴い、キャットウォークが負担する素線重量が増えるため、キャットウォークが徐々に沈下していく。その結果、架設される各素線にサグ差(スプレッド)が生じ、ケーブル内の応力分布の不均衡を引き起こすため、キャットウォークの沈下量の変動を抑制する必要があった。スプレッドを抑制するため、本工事では、ケーブル架設前にキャットウォーク上にカウンターウェイトを設置しておき、沈下量に応じてカウンターウェイトを除荷し、沈下量の変動を抑制する手法を採用した。上流側ケーブルと下流側ケーブルは同時に施工しないため、写真-3-8 に示すようにカウンターウェイトはクロスブリッジ上に設置し、上下流間での移設が容易にできるようにした。さらに、カウンターウェイトには水を採用し、ポンプの使用により容易な移設を可能にすることで作業の効率化を図った。

低張力工法では、ストランド架設完了後、各径間のストランドに設計張力を導入するため、ストランドをアンカレッジ側へ引き込む作業が必要になる。そのため、引き込み実施前に、544本の素線群を円形に締め付けて1本のストランドに収束させる。本工事では、

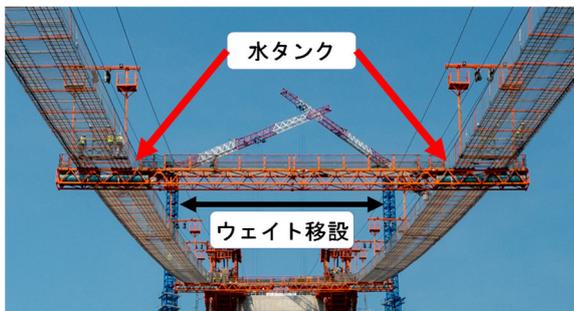


写真-3-8 キャットウォーク カウンターウェイト



写真-3-9 ストランド締め付け作業状況

専用治具とコードレス電動インパクトレンチで素線群を締め付け後、約3m毎にポリアミド製結束バンドで円形にする手法を採用した(写真-3-9)。これにより、従来式の油圧ジャッキと鉄製結束バンドによる締め付け作業に比べて作業効率が向上した。

## 4. 補剛桁の製作・輸送

### 4.1 補剛桁の製作

補剛桁の製作については、イタリアの橋梁メーカーに発注し、同グループ傘下のルーマニア東部ブライラ市に位置する造船所で製作した(写真-4-1)。発注範囲は材料調達を含む製作および現地輸送である。本造船所はドナウ川に面し、架橋地点の9km上流に位置する。本造船所は橋梁製作の経験を有していなかったため、パネルライン、仮組立工場、塗装工場の新設および保管ヤード拡張等の設備投資が行なわれている。また、日本およびイタリアの技術者を工場に常駐させ、指導を行いながら製作を進め、21,000tonの補剛桁を約2年で製作した。主要鋼材の購入先は、製作工場である造船所より北に23km離れたルーマニア最大の製鋼所であった。

### 4.2 補剛桁の輸送

架橋地点への輸送には、係留なしで定点保持を可能とするDPS(ダイナミックポジショニングシステム)が搭載された自航台船2隻を使用した。造船所敷地内の船舶昇降装置により、自航台船をクレーン下に陸揚げした後、100ton吊ジブクレーンの相吊り作業(4台もしくは2台)により補剛桁を搭載した。補剛桁2ブロックの搭載後、再度昇降装置により自航台船をドナウ川に進水させた後、現地へ輸送した(写真-4-2)。



写真-4-1 製作工場である造船所の全景



写真-4-2 自航台船による補剛桁の輸送状況

架設地点の近傍にて補剛桁を製作し、かつ製作工場に近い製鋼所より材料を購入したため、材料および製品輸送に伴う温室効果ガスの排出量を大幅に削減することができた。

## 5. 補剛桁の架設

### 5. 1 補剛桁架設概要

#### (1) 補剛桁の諸元

ブライラ橋の補剛桁諸元を以下に示す。

- ・補剛桁断面：流線形1室箱断面(図-5-1)
- ・標準ブロック長：25m
- ・総ブロック数：86



写真-5-1 架設現地 俯瞰写真

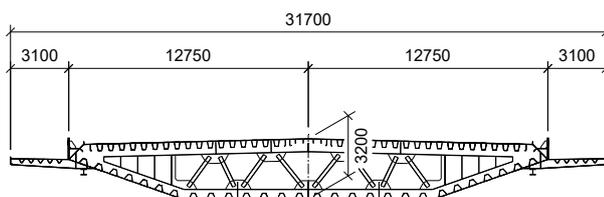


図-5-1 補剛桁断面 (寸法単位: mm)

#### (2) 架橋地点の地形的特徴

架橋地点のドナウ川水位は年に5~6m程変動し、年によっては、海拔が高い側径間範囲の高水敷も河川水面下に沈む。本工事では施工効率向上のため、中央径間の主塔近傍と側径間に、年間を通して水没することのない盛土による工事用道路を下部工施工時に造成した。これにより、アンカレッジ付近の一般道、仮設ヤードから主塔基部への資機材の陸上輸送が可能となった。一方、この工事用道路造成によって、補剛桁の陸上架設範囲が全橋長の約6割を占めた。

#### (3) 架設サイクル

補剛桁架設の基本サイクルとして、1日2ブロックを製作工場から架設現地へと輸送し、荷取りを行った。桁ブロックの架設手順を以下に示す。

- ① 自航台船により、桁ブロックを工事用道路縁端まで輸送、定点保持。
- ② 荷揚げ設備により、桁ブロックを自航台船から水切り。
- ③ 荷揚げ設備により、桁ブロックを陸側へスイング(写真-5-2、図-5-2)。
- ④ 荷揚げ設備により、桁ブロックを工事用道路上にて待機中の多軸台車に降下。
- ⑤ 多軸台車により、桁ブロックを陸上の直下吊り地点まで移送。
- ⑥ 直下吊り設備により、桁ブロックを目標高度へ吊上げ(写真-5-3)。
- ⑦ 桁ブロックをハンガーに定着し、既設ブロックと仮ヒンジ連結。

以上が、陸上架設範囲の桁ブロックの架設手順である。一方、河川上架設範囲の桁ブロックについては、



写真-5-2 荷揚げ状況

上記の②～⑤の手順が不要となり、吊上げ地点直下において自航台船を定点保持し、直下吊りを行った。

#### (4) 全体架設ステップ

箱桁式吊橋の補剛桁架設ステップでは、架設系と完成系の形状差を抑えるため、支間中央または桁端から主塔へと架設を進め、閉合は主塔近傍で行われることが一般的である。一方、本工事では、以下に記す制約①～③によって、非対称かつ変則的な架設順序を採用せざるを得なかった。

##### ① 中央径間の閉合箇所

本工事では、陸上範囲の桁ブロックが過半数を超えるため、桁架設の終盤まで荷揚げ作業が継続した。そのため、荷揚げ箇所の桁ブロック架設を先行して完了



写真-5-3 直下吊り状況

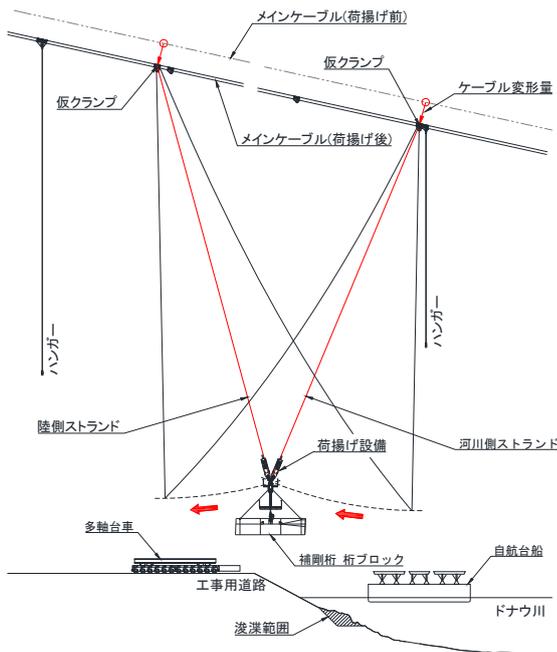


図-5-2 荷揚げ設備によるスイング要領

することができず、中央径間の閉合は、主塔近傍ではなく荷揚げ地点で実施される必要があった(図-5-3)。

##### ② 主塔部におけるメガブロック架設

主塔周りの3ブロックは、完成時にハンガーと連結されない。そこで、これらを隣接2ブロックと工事用道路上で地組溶接し、桁架設中盤に「メガブロック」として吊り上げた。本メガブロックの総重量は約1,100tonに達し、各岸の中央径間および側径間に配備された直下吊り設備を集約して吊上げを実施した(図-5-4)。

##### ③ 桁端部におけるメガブロック架設

桁端の2ブロックもまた完成時にハンガーと連結されない。そこで、これらを隣接ブロックと仮設ベント上で地組溶接し、桁架設中盤にメガブロックとして吊り上げた。地組溶接中のメガブロックと吊上げブロックの干渉を避けるため、桁端から4番目のブロックは閉合ブロックとし、メガブロック架設完了後にこれを架設した(図-5-5)。

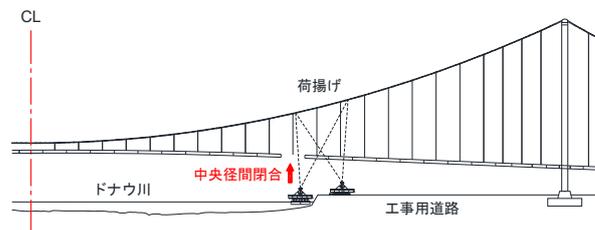


図-5-3 中央径間閉合箇所

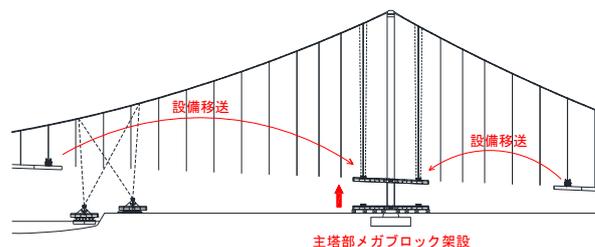


図-5-4 主塔部 メガブロック架設

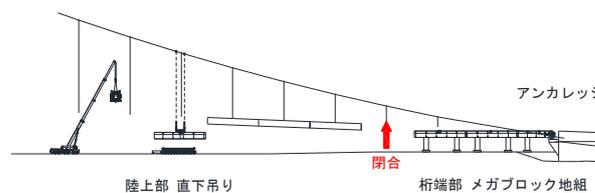


図-5-5 桁端部 閉合箇所

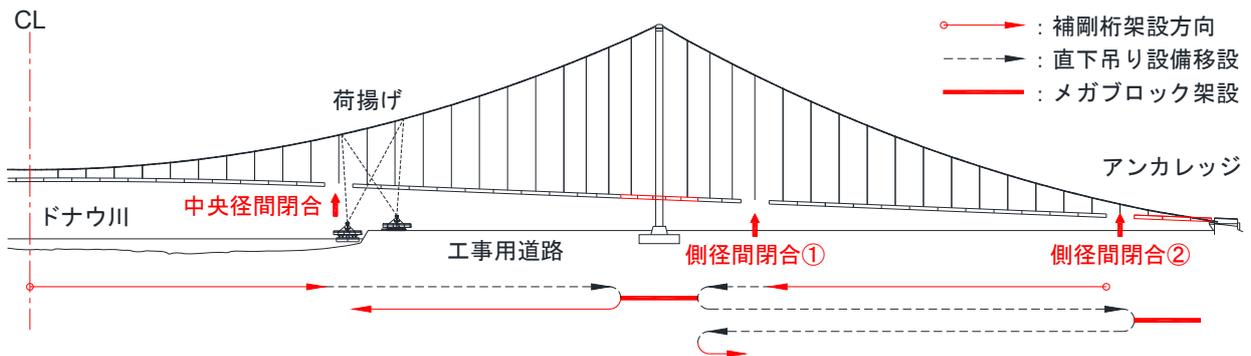


図-5-6 直下吊り設備 移設距離

以上の施工上の制約に加え、中央径間と側径間のメインケーブル張力差によって生じる主塔の過剰変位や、塔頂サドル上でのメインケーブルの滑りを発生させない、さらには閉合に要する強制力を抑制する等の設計的制約も考慮され、補剛桁の架設ステップが決定された。結果として、補剛桁の架設順序は一方向には進まず、橋梁全体で6箇所閉合ブロックを有し、直下吊り設備の長距離移設が度々発生した(図-5-6)。

#### (5) マルチストランドジャッキの採用

本工事の荷揚げ設備、直下吊り設備の揚重機には、国内の既往吊橋工事で使用されてきたウインチではなく、欧州や中国で使用実績の多いマルチストランドジャッキを採用した。マルチストランドジャッキを採用することにより、吊上げに要する設備一式を一箇所に集約でき、ウインチ式設備を採用した場合に必要な索道の設営、解体時間を省略できるため、総合的な工期の短縮が可能となった。図-5-7に、既往工事で採用されたウインチ式の補剛桁吊上げ装置の設備の概略図を示す。一方、マルチストランドジャッキの吊上速度は、ウインチによる吊上げに対し比較的低速(15~40m/h)となる。

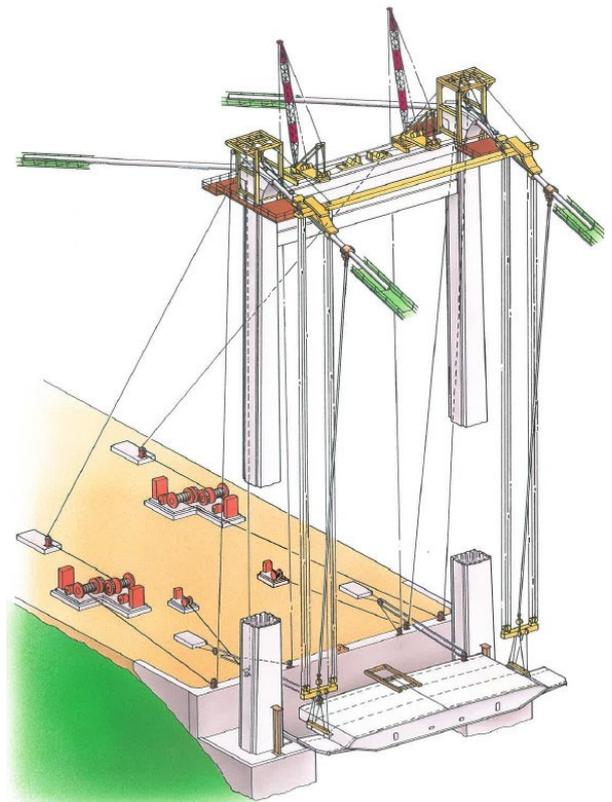


図-5-7 第2ボスポラス橋 補剛桁吊上げ装置

### 5.2 直下吊り

5.1で言及したとおり、直下吊り設備の長距離移設を架設期間中に複数回行う必要があった。この移設作業によって補剛桁架設の全体工程が遅延することのないよう、直下吊り設備の機動性を向上させることが設備設計上の重要課題であった。写真-5-4に示すような従来式のメインケーブル上集約型直下吊り設備を採用した場合、重量のあるガントリー型設備を勾配のあ



写真-5-4 オスマン・ガーズィー橋 直下吊り設備

るメインケーブル上で横行させる必要があり、その移設と固定作業に多大な労力とを要する。そこで本工事では、国際的にも数例の実績しかない桁側集約型の直下吊り設備を採用し、関連設備一式(吊天秤、ジャッキ、ストランドリコイラー、油圧ポンプ、発電機)をユニット化することで、小型かつ機動性に優れた直下吊り設備を実現した。設備移設の際には、本ユニットを河川上では専用の降下装置(写真-5-5)、陸上では移動式クレーンを使用し、既設の補剛桁上から河川上または陸上に降下し、台船またはトラックによる迅速な移設を可能とした(写真-5-6)。



写真-5-5 河川上 直下吊り設備 降下装置

## 6. おわりに

施工中には、2020年初頭から世界的に広がったCOVID-19のパンデミック、2022年2月から続くロシアによるウクライナ侵攻など、想定外の環境の変化があり、物価の上昇・物資不足・重機の手配困難など大きな影響を受けたが、幸いにも工事がストップするような非常事態には至らず、2023年7月に無事交通開放を迎えることができた(写真-6-1)。



写真-5-6 クレーンによる直下吊り設備の降下

最後に、本工事の遂行にあたっての、CNAIR, MIPA, Verifier, その他社内外の皆様の多大なるご支援とご協力に深く感謝申し上げます。

### [参考文献]

- 1) 島 宜範, 井谷 達哉, 社浦 潤一, 古賀 彰展, 杉田 吏絵, 工藤 光弘, 井上 学: ルーマニア・ブレイラ橋の設計および施工ー設計概要およびアンカレッジ・主塔の施工ー, IHI インフラ技報 Vol. 11, pp. 121-136 (2022. 11)
- 2) 關 真二郎, 武田 康太郎, 村野 文哉, 柳 博文, 川島 大助, 太田 慎也, 内田 裕也, 中山 真明: ブライラ橋を含む23kmの国道建設工事報告ーケーブル架設工事ー, IHI インフラ技報 Vol. 12, pp. 46-51 (2023. 11)
- 3) 川野 清浩, 村野 文哉, 井谷 達哉, 庄野 好希, 關 真二郎, 杉田 吏絵, 中山 真明, 社浦 潤一: ブライラ橋を含む23kmの国道建設工事報告ー補剛桁の製作・架設ー, IHI インフラ技報 Vol. 12, pp. 52-60 (2023. 11)
- 4) トルコ共和国第2ボスポラス橋 工事写真集



写真-6-1 吊橋全景 交通開放後