

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

目次

1. 工事概要

2. 主塔架設

- スリップフォーム工法によるコンクリート主塔の架設

3. ケーブル架設

- 低張力エアスピニング工法によるメインケーブル架設

4. 補剛桁架設

- ストランドジャッキ桁側集約設備による架設

1. 工事概要

1-1. 工事概要

➤ 所在地

ルーマニア，ブライラ市

➤ 施主

ルーマニア道路インフラ公社

➤ 開通

2023年7月

➤ 施工者

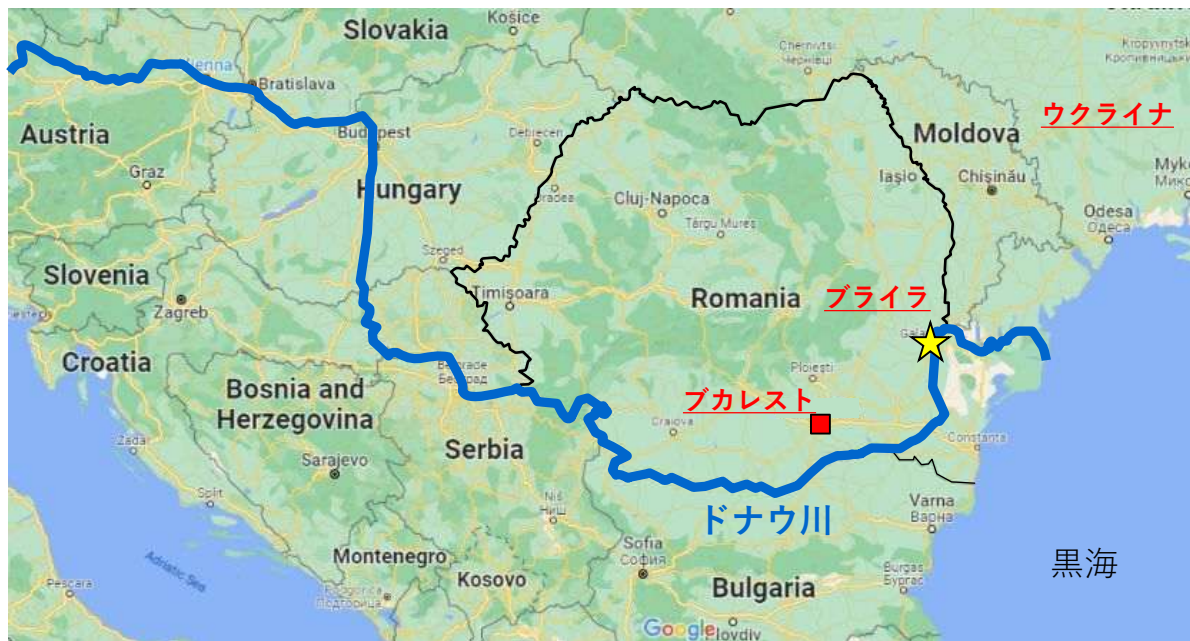
IHIインフラシステム－Webuild

➤ 施工管理

Asocierea M.I.P.A.（ルーマニア・イタリアのコンサルJV）



1-2. ルーマニアについて

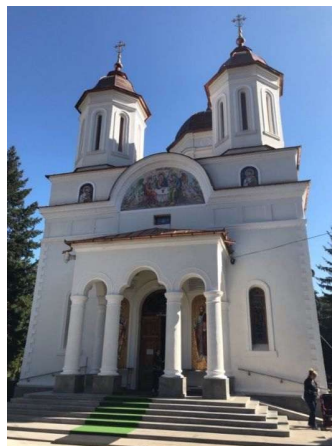


1-2. ルーマニアについて

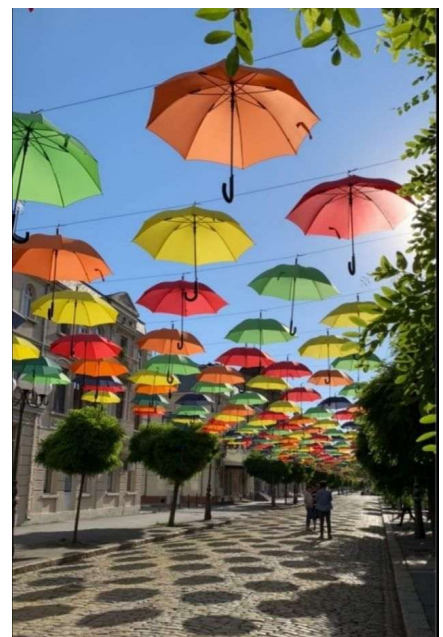
- 首都：ブカレスト
- 人口：約1,900万人（EU圏内で6番目）
- 公用語：ルーマニア語
- 主要宗教：ルーマニア正教



ルーマニア名物のサルマーレ

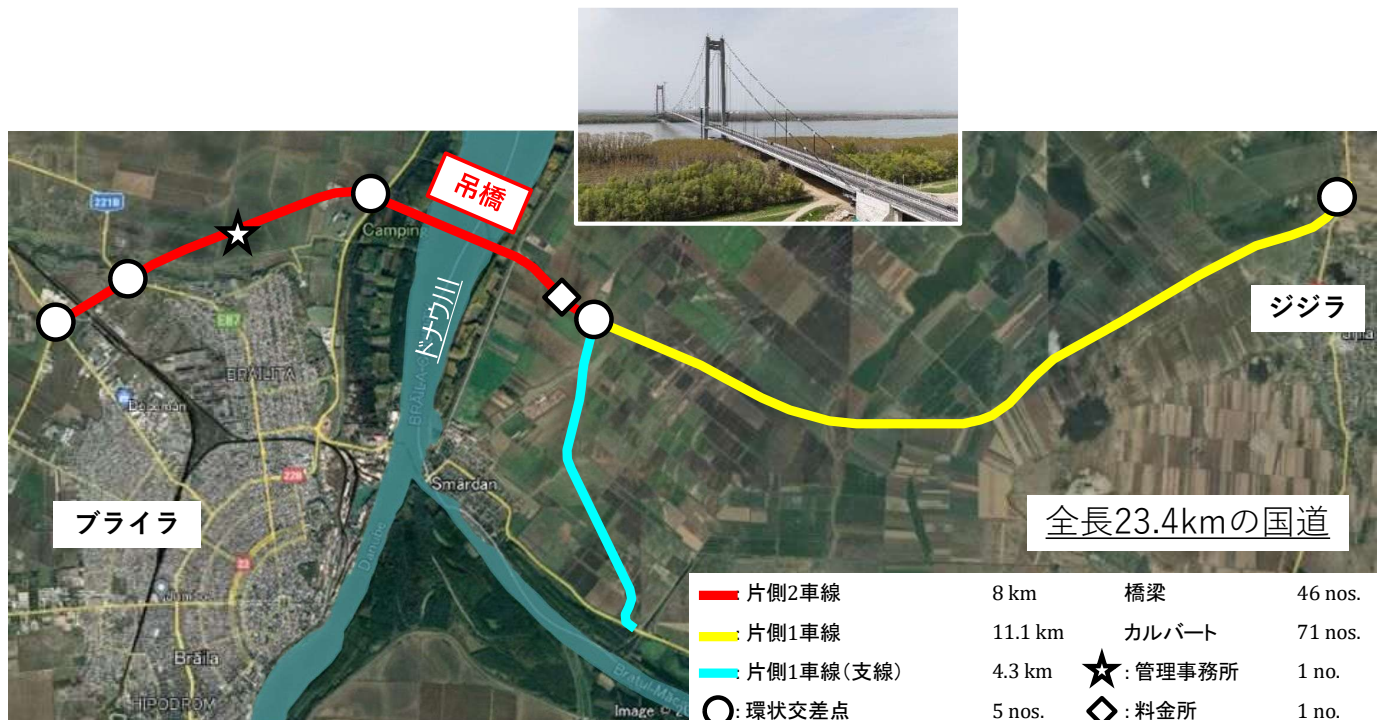


街中の教会

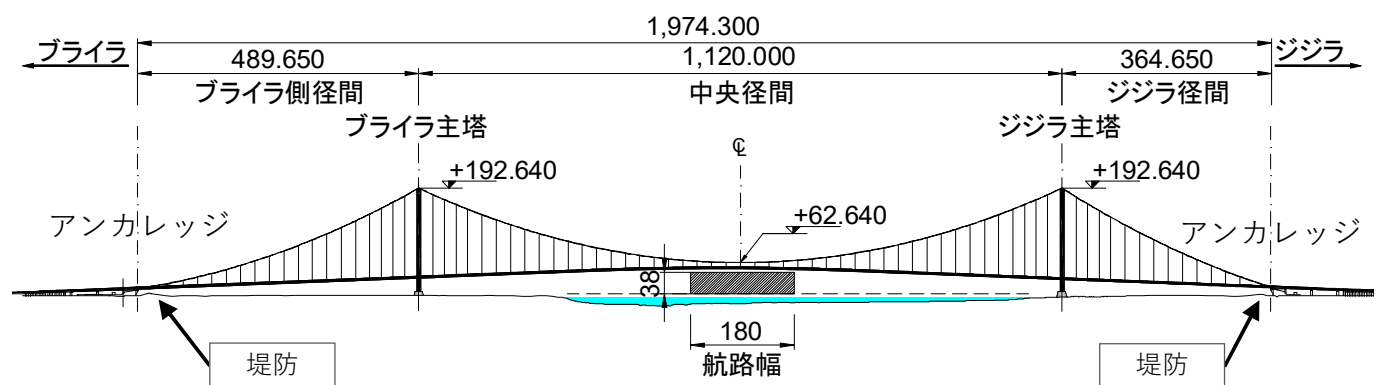


ブライラ市 (情緒ある街並み)

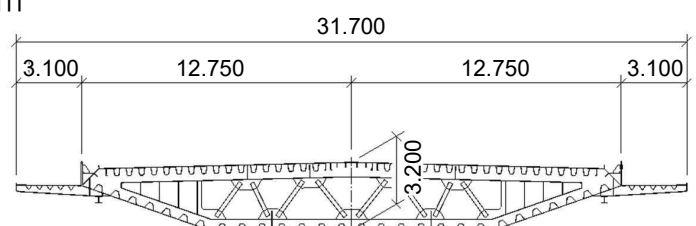
1-3. プロジェクト全体図



1-4. 橋梁一般図



- 形式：3径間連続補剛桁吊橋
- 全長：1,974m，中央径間長：1,120m
- 主塔高：190m
- 桁高：3.2m、幅員：31.7m
- ルーマニア初、東欧最長の長大吊橋



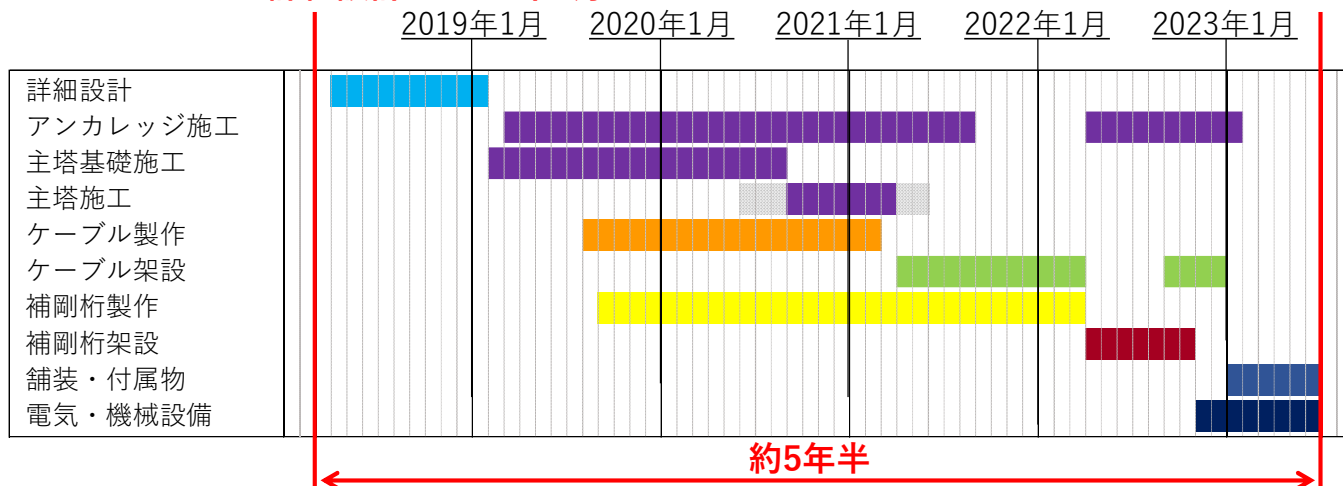
1-5. 工事工程

2018年：契約調印，詳細設計
 2019年：アンカレッジ，主塔基礎
 2020年：主塔
 2021年：ケーブル
 2022年：補剛桁
 2023年：舗装・付属物



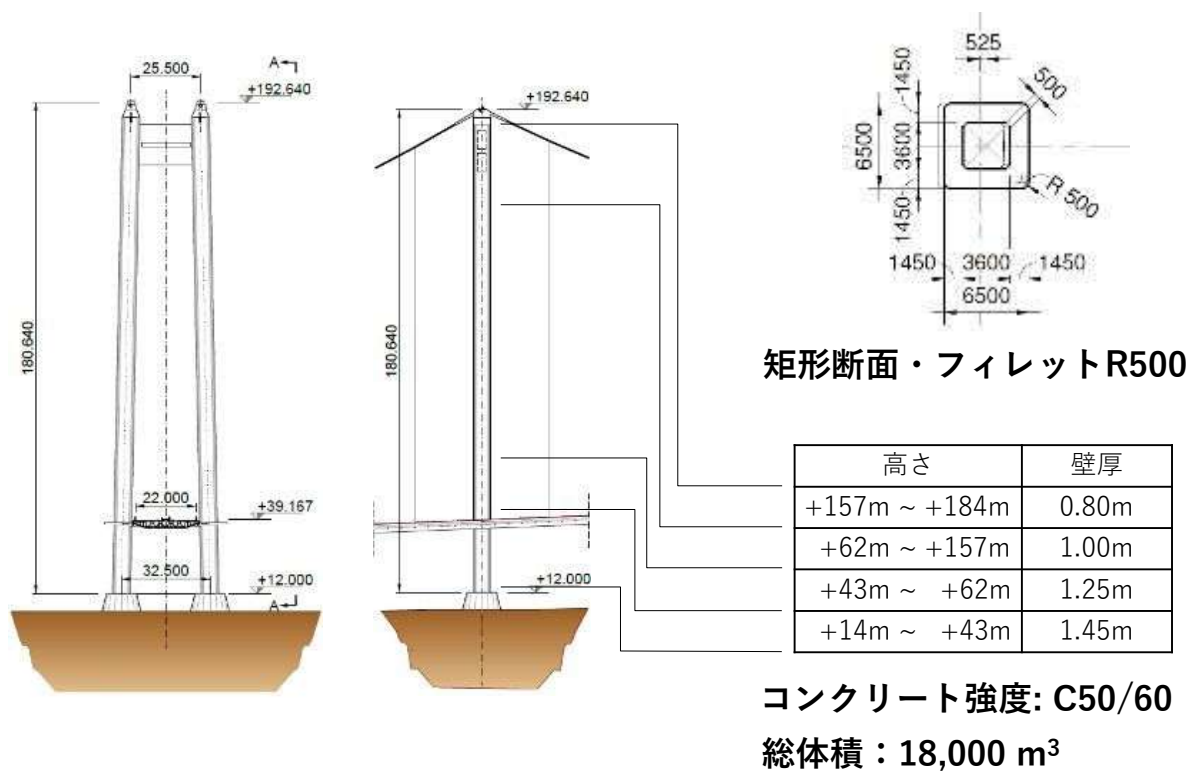
詳細設計：2018年3月

開通：2023年7月



2. 主塔架設

2-1. 主塔概要

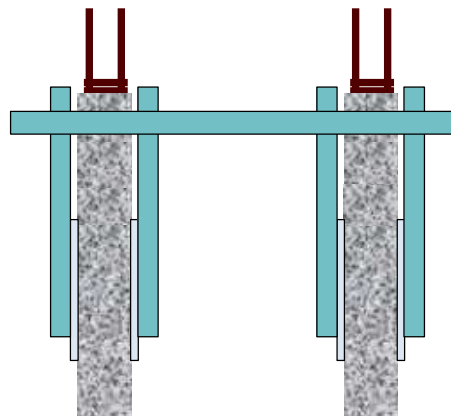


2-2. スリップフォーム工法による施工



2-3. スリップフォーム工法の特徴

特徴	スリップフォーム <ul style="list-style-type: none"> 型枠・足場・上昇設備を一体化して地組 型枠の上昇と、鉄筋配置、コンクリート打設を24時間連続で実施
品質	<ul style="list-style-type: none"> 理論上、打ち継ぎ目無し 特別な配合設計・管理が必要
設備	<ul style="list-style-type: none"> 型枠・ジャッキ・足場等含めてシステム化
工期	<ul style="list-style-type: none"> 設備組み立て：1ヵ月 施工開始後：3ヵ月 (2~2.5m/日)



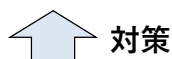
2-4. 凝結時間の調整

スリップフォーム工法では、

- コンクリートの凝結が**早すぎると**、コールドジョイントが発生。またコンクリートと型枠が固着し、型枠せり上げが困難に。
- コンクリートの凝結が**遅すぎると**、型枠せり上げ時のクラック発生を誘発。また配筋作業へと移れず、施工速度が停滞。



気温等の環境変化を考慮しつつ、コンクリートの凝結を適度な速度で進行させる必要あり。



対策

- 表面凝固遅延剤（リターダー）の添加による硬化時間の調整。
- 夏季：型枠表面への冷水散布や、練り混ぜ水に冷水を使用し、凝結を遅延させる。
- 冬季：型枠表面に温熱ブランケットを設置し、コンクリートの温度を上げ、凝結を促進。

2-5. モックアップの作成



試験時の充填不良

- 主塔断面の4分の1コーナーを実寸で再現
- 配合設計と並行して試験を実施
- 型枠のせり上げサイクルに対応したコンクリートの品質確保

2-6. 主塔の出来形管理

出来形管理 技術課題

- 自重による主塔の倒れの影響をどう打ち消すか。
- 水平梁架設時の塔柱間隔をどう確保するか。



対策オプション

- ① 【キャンバー付与】自重による倒れと逆方向の施工キャンバーを与え、倒れを相殺。
- ② 【ジャッキによる矯正】設計値をターゲットとする。塔柱中段に仮横梁を設置。本設横梁設置前に、油圧ジャッキで倒れを強制的に解消。
- ③ 【仮横梁による拘束】設計値をターゲットとする。仮横梁を数段設置。倒れを無視できるほどに抑制。

⇒ 鉄筋量追加

仮設資機材の重量増加

工程長期化



2-6. 主塔の出来形管理

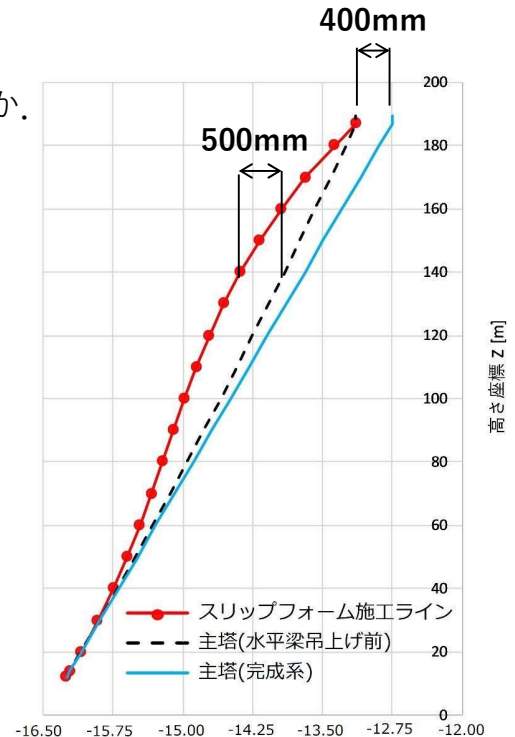
出来形管理 技術課題

- 自重による主塔の倒れの影響をどう打ち消すか。
- 水平梁架設時の塔柱間隔をどう確保するか。



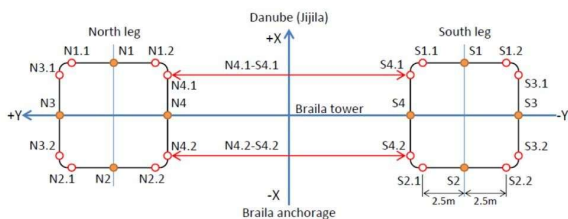
対策オプション

- ① 【キャンバー付与】 自重による倒れと逆方向の施工キャンバーを与え、倒れを相殺。
- ② 【ジャッキによる矯正】 設計値をターゲットとする。塔柱中段に仮横梁を設置。本設横梁設置前に、油圧ジャッキで倒れを強制的に解消。
- ③ 【仮横梁による拘束】 設計値をターゲットとする。仮横梁を数段設置。倒れを無視できるほどに抑制。

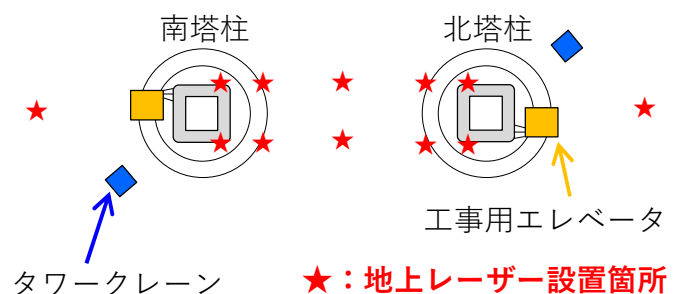


2-7. 主塔の精度管理

① トータルステーションによる計測

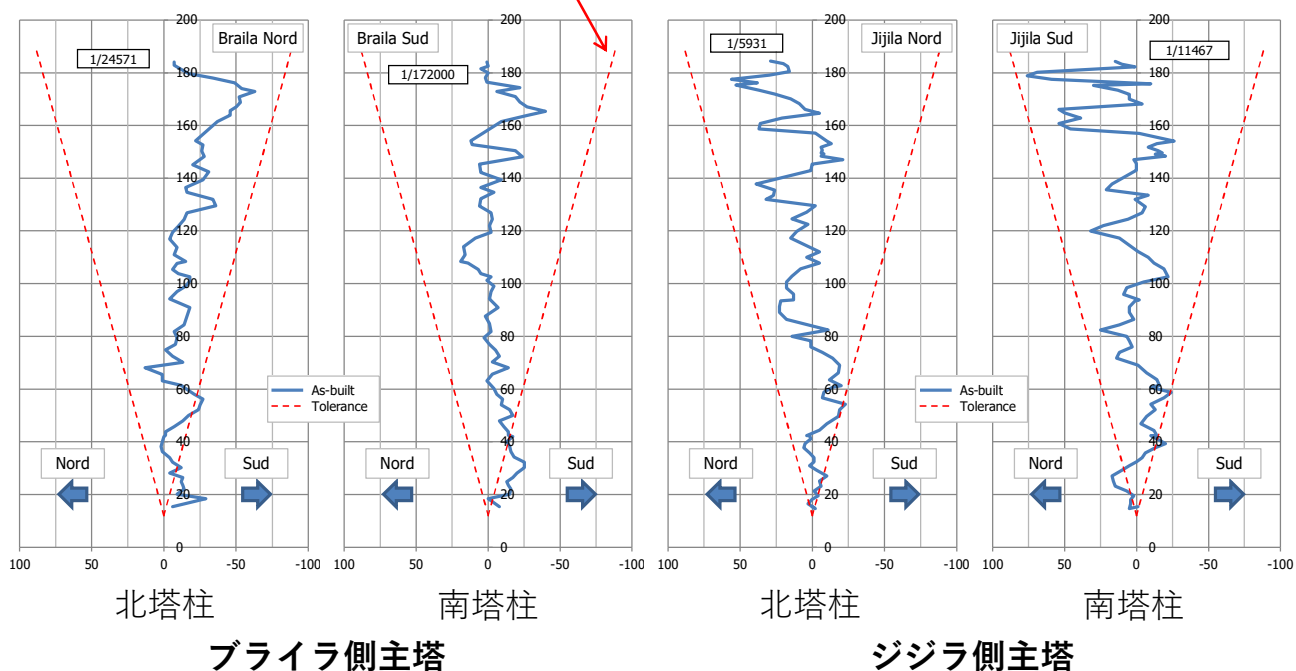


② 地上レーザーによる計測



2-8. 塔柱の出来形結果（橋軸直角方向）

許容値：塔頂で $\pm H/2000 \Rightarrow \pm 90\text{mm}$



2-9. 水平梁の吊上げ

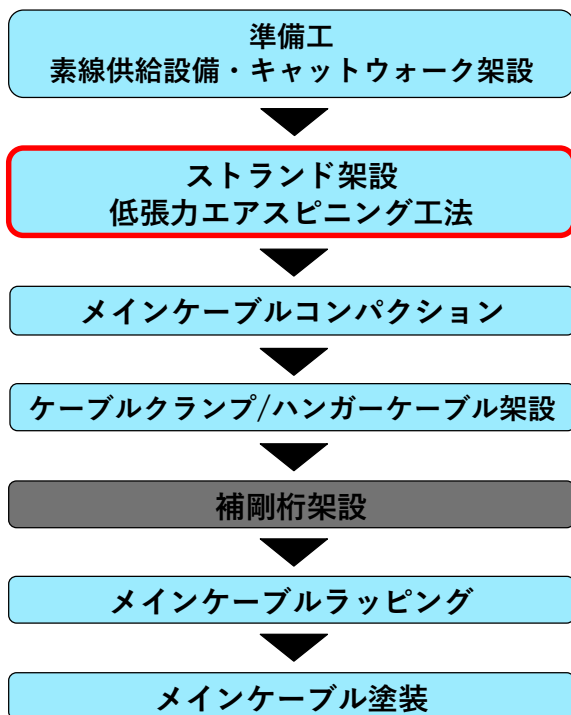


2-10. 主塔の完成状況

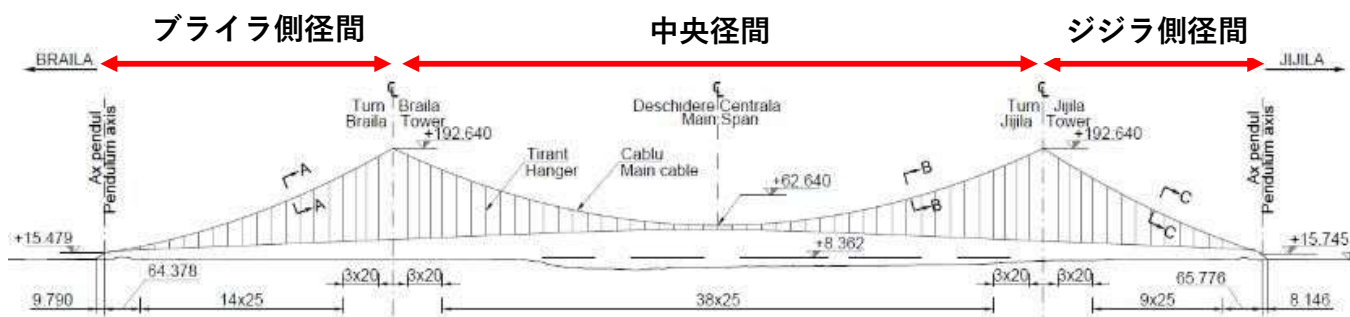


3. ケーブル架設

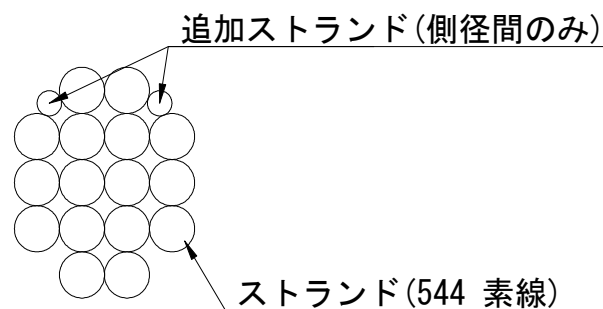
3-1. ケーブル架設の流れ



3-2. ケーブル諸元

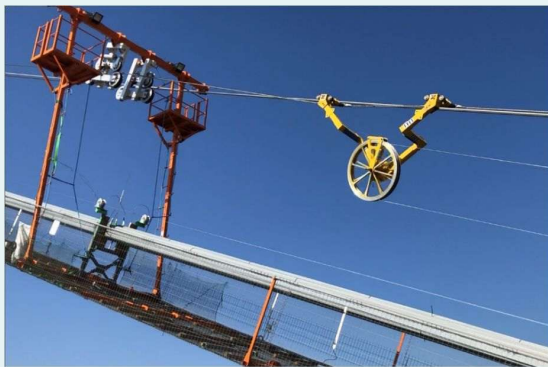



ケーブル諸元	ブライラ側径間	中央径間	ジジラ側径間
素線数 [本]	9,008	8,704	9,264
ストランド数 [本]	16+2	16	16+2
1ストランド当たりの素線本数 [本]	544 (152)	544	544 (288)
ケーブル径 [mm]	571	561	579

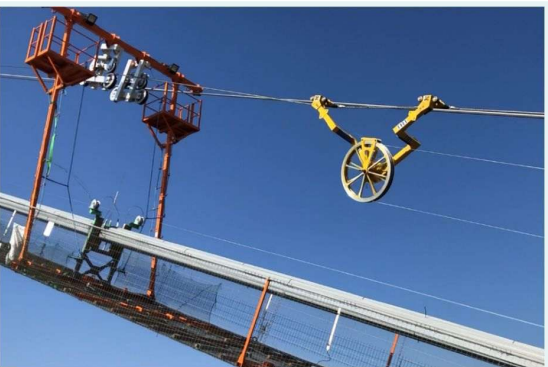



ケーブルコンパクション前のストランド配置

3-3. ケーブル架設工法 AS工法 vs PPWS工法

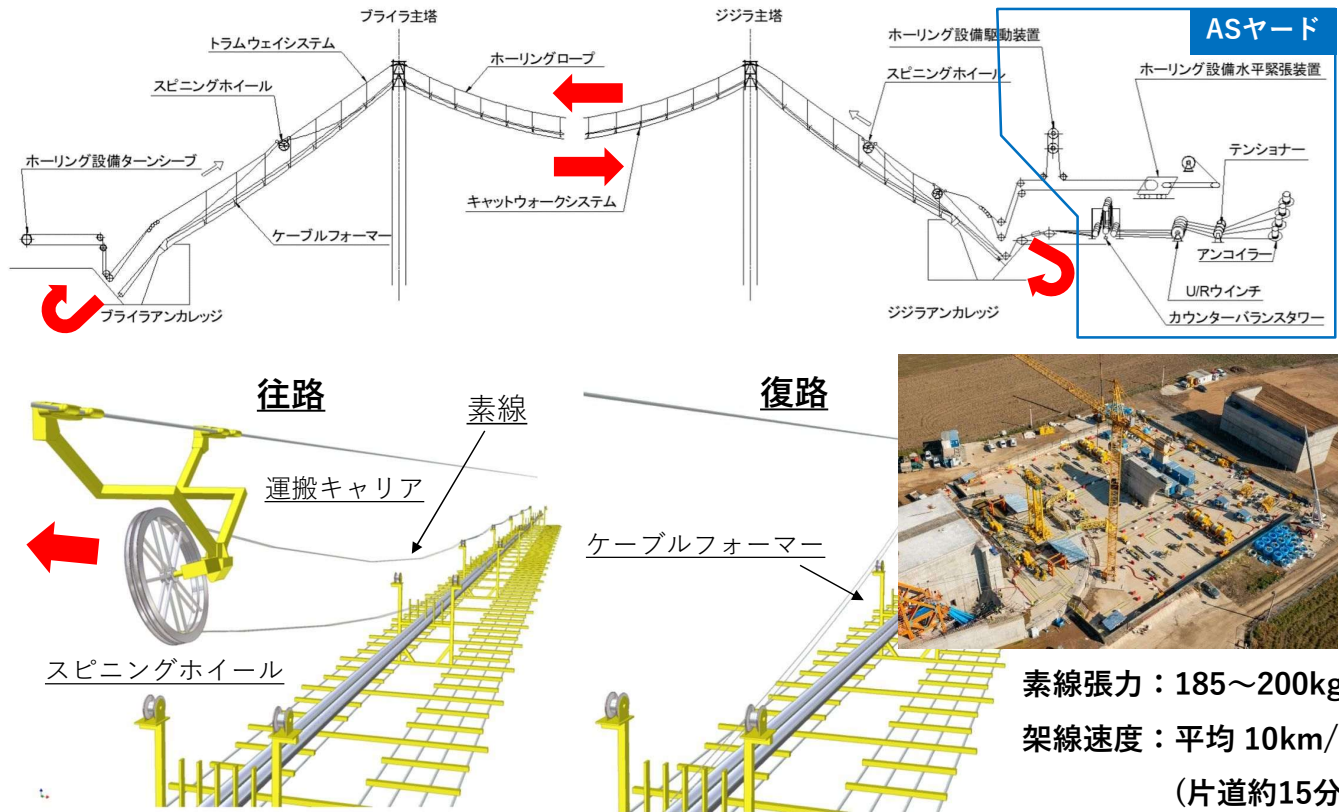
	Aerial Spinning AS 工法	Prefabricated Parallel Wire Strand PPWS 工法
イメージ		
概要	<ul style="list-style-type: none"> ・ 素線単位で架設, 現地で一定本数を束にしてストランドに収束 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 工場製作したストランドを一括架設
設備	<ul style="list-style-type: none"> ・ ホーリングシステム ・ 素線のリーリング/アンリーリング設備 ・ アンカレッジ近くに広い敷地が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ホーリングシステム ・ ストランドのアンリーラー設備 ・ ストランド単位で移送する重機が必要
品質	<ul style="list-style-type: none"> ・ ストランドを現場で施工 ⇒ 素線長さのバラつき(スプレッド)を抑えるための管理が必要 	<ul style="list-style-type: none"> ・ ストランドを工場製作 ⇒ 安定した品質

3-3. ケーブル架設工法 AS工法 vs PPWS工法

	Aerial Spinning AS 工法	Prefabricated Parallel Wire Strand PPWS 工法
イメージ		
工期	<ul style="list-style-type: none"> ・ 比較的長い 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 比較的短い
ストランド サイズ 本数	<ul style="list-style-type: none"> ・ ストランド 1 本あたりの素線本数を多くすることが可能. ⇒ ストランド太径 / 本数少ない ⇒ アンカレッジ小型化 ⇒ サグ調整回数 減少 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 製作/輸送上の制約から, ストランド 1 本あたりの素線本数が少ない. ⇒ ストランド細径 / 本数多い ⇒ ストランド仮引き・サグ調整時のハンドリングが容易

↑ ブライラ橋で採用

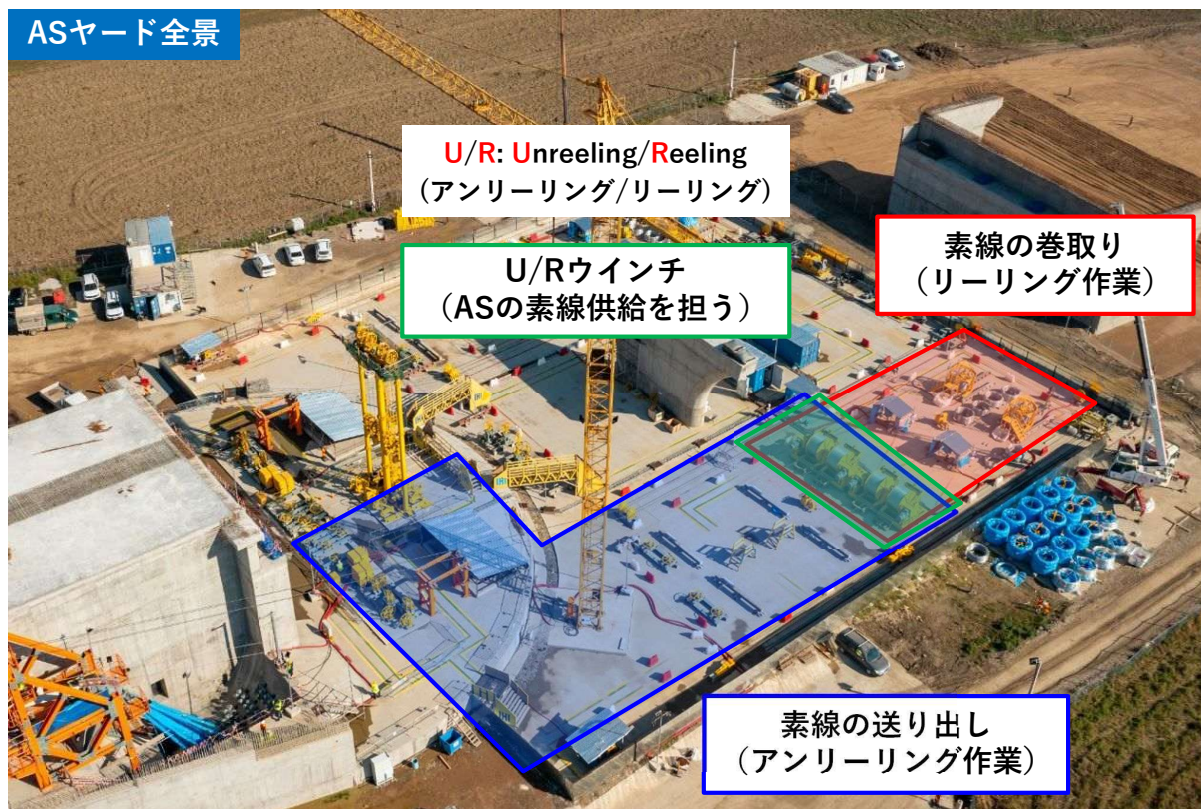
3-4. AS工法の概要



3-4. 参考動画 運搬キャリアによる素線架設



3-5. 素線供給設備 ASヤード



3-6. リーリング作業

リーリング作業：コイルから素線を解き出し，U/Rウインチに巻き取る作業。

【既往工事からの改善点】

- ① アンコイラー：「水平巻解き/従動式」から「上方巻解き/駆動式（電気設備）」へ変更。
⇒ **素線の引っかかりを防止。**
- ② テンショナー：「手動ブレーキ」から「電気制御のパウダーブレーキ」へ変更。
⇒ **巻き取り張力の安定化。**
- ③ 制御システムの導入：設定リーリング速度においての**各設備連動運転**を実現。



上記の改善により，
リーリング作業の安定化を実現。

3-6. 参考動画 リーリング作業

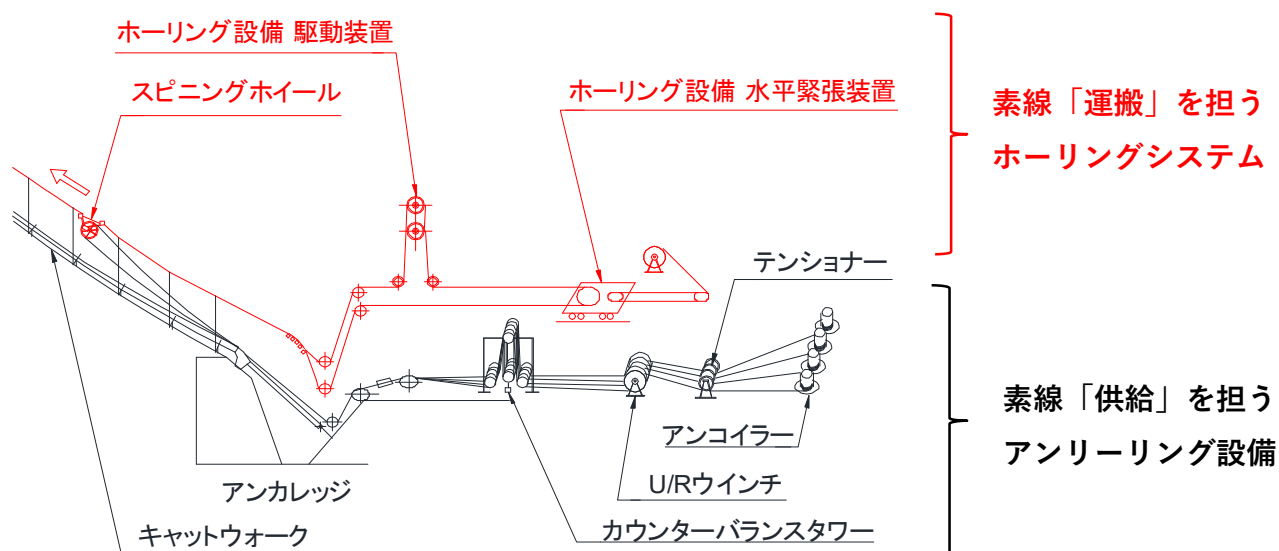


3-7. アンリーリング作業

アンリーリング作業：U/Rウインチから素線を一定張力で解き出す作業。

【既往工事から継続】

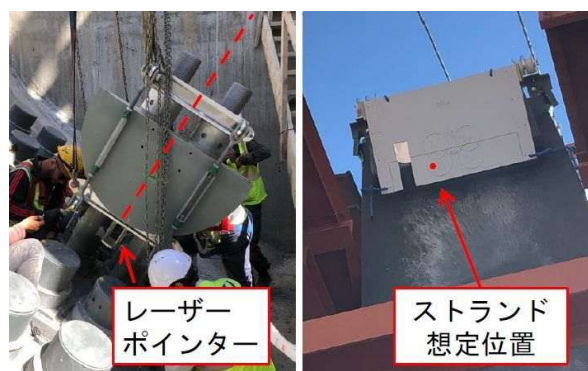
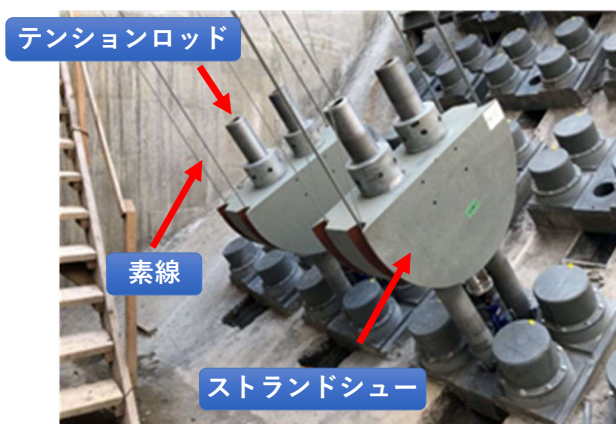
- **制御システムの導入：**操作室で入力した速度情報を基に、素線の供給元であるU/Rウインチの回転速度と、別系統の素線運搬システムの移動速度を連動。



3-7. 参考動画 アンリーリング作業



3-8. 素線定着部 ストランドシュアの据付



据付時の精度管理の状況

- ストランドシュア：素線をアンカレッジに定着するための構造物。半円型の鋳物製シュアと2本のテンションロッドで構成される。
- ストランドシュアの要求据付角度：設計方向に対し $\pm 0.5^\circ$ 以内（超過すると、完成時に過大な曲げがロッドに作用）
- ストランドシュアの据付精度管理：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。シュア中心にロッドと平行なレーザー用孔あり。

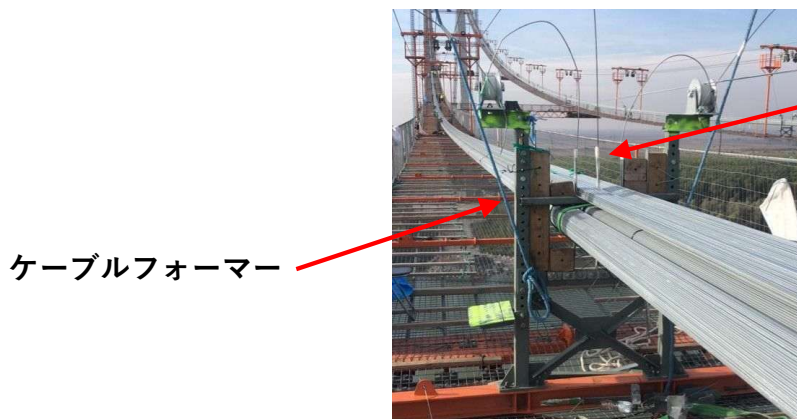
3-9. AS工法 フリーハング vs 低張力

➤ フリーハング工法：素線1本ずつ所定の**設計張力**（所定サグ）に調整

- 素線が宙に浮いており，風の影響を受けやすい。
- 素線同士が絡まる(交差する)ことが多く，素線群をほどく作業が発生。

➤ 低張力工法：**設計張力より低い張力**でケーブルフォーマーに素線を載せていく

- ケーブルフォーマーに接しているので風の影響を受けにくい。
- フォーマー内に整然と並ぶので，素線同士が絡まることはない。



スペーサー：
各ストランドの素線を仕分
けて架設するための治具

3-10. スプレッドとは？

スプレッド：ストランドを構成する素線群の断面方向のばらつき

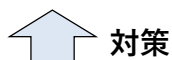
- 発生要因：素線引出張力の誤差，風による引出素線の蛇行，**キャットウォーク沈下**等
- 許容値：ブライラ橋では，ストランド径の5倍。



3-11. キャットウォーク沈下量の抑制

低張力工法：キャットウォーク上のケーブルフォーマーに素線を載せていく。

⇒ 架設が進むにつれてキャットウォーク沈下 ⇒ **スプレッドの主要因**

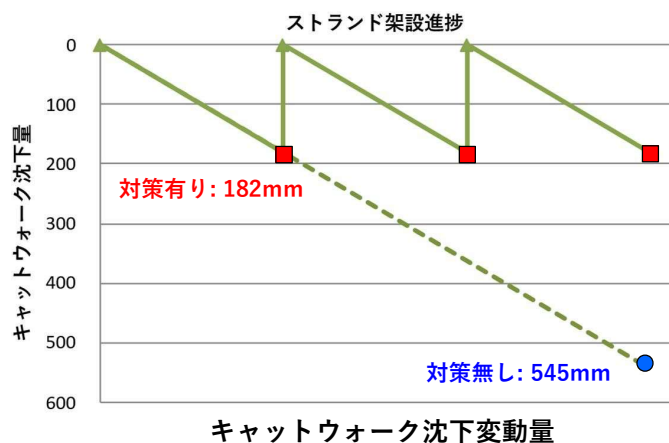
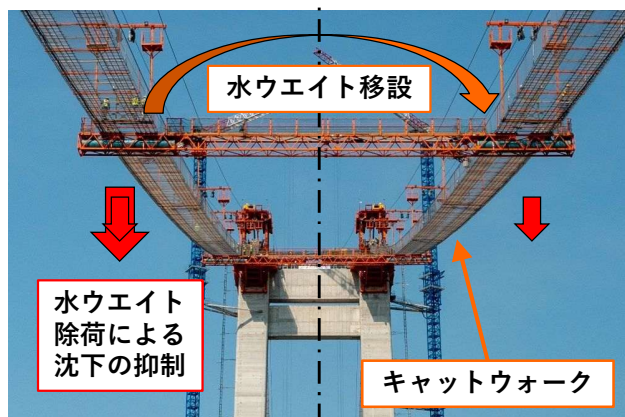


対策

あらかじめ、キャットウォーク上に一定間隔で**水ウェイト**を設置

【AS稼働ライン】

【AS非稼働ライン】



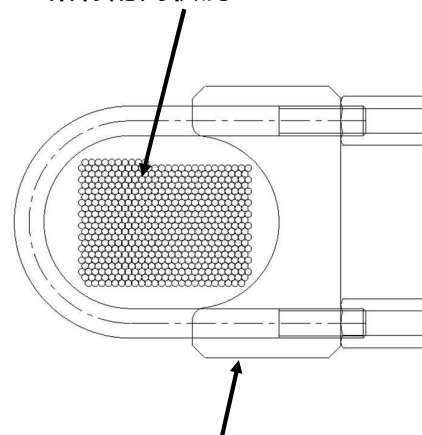
3-12. ストランド締め付け専用治具

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てストランドに収束

⇒ 従来の油圧ジャッキによる締め付け作業に比べて**作業効率が向上**



ケーブルフォーマー上の
素線配列状況



ストランド締め付け専用治具

3-13. スtrandのサグ調整

ストランド形状の管理手順

- 昼間：前準備（ストランドの締め付け作業，サグアップ作業，引き込み設備の据付）
- 夜間：ストランドの温度偏差が少ない時間帯にサグ計測，各径間のサグ調整
 - 絶対サグ計測：基準ストランドのサグ形状をトータルステーションで視準して計測
 - 相対サグ計測：基準ストランドからの相対位置（高低差）を各支間中央位置で計測



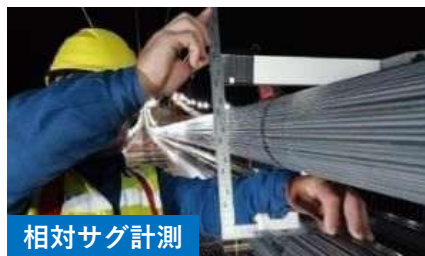
ストランド引き込み設備の設置



ストランド上のプリズム



絶対サグ計測

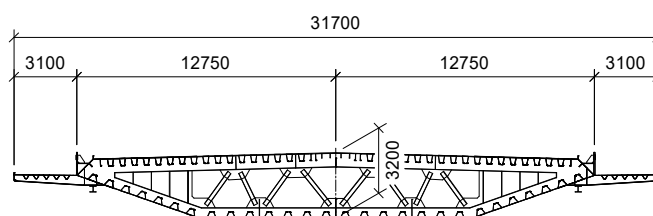


相対サグ計測

4. 補剛桁架設

4-1. 補剛桁架設 概要

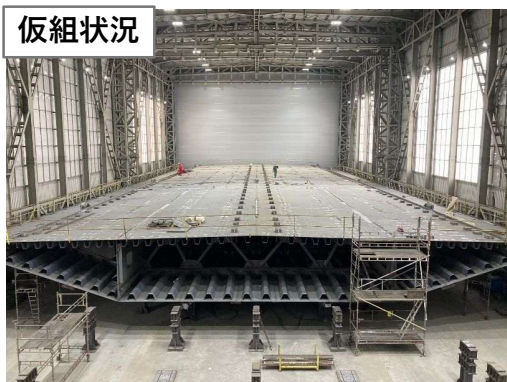
- 補剛桁架設 所要期間:
2022年 5~9月 (継手溶接含む)
- 補剛桁 断面形状
流線形一室箱断面
- 吊ブロック重量 (一般部)
260 ton
- 吊ブロック数
86
- 補剛桁総重量
約 21,000 ton
- 補剛桁主要寸法
総幅員 31.7m, 桁高 3.2m, ブロック長25m



4-2. 補剛桁の製作

- 補剛桁の製作は、架橋地点の9km上流に位置する造船所にて実施。
- 材料となる鋼板は、造船所より23km離れたルーマニア最大の製鋼所より購入。
- **21,000 tonの補剛桁を約2年で製作。**
- 造船所は、橋梁製作の経験を有していなかった。
 - ⇒ **設備投資**：パネルライン，仮組立工場，塗装工場を新設，保管ヤード拡張。
 - ⇒ **日本人SVを工場に常駐**させ，製作指導を行った。

仮組状況



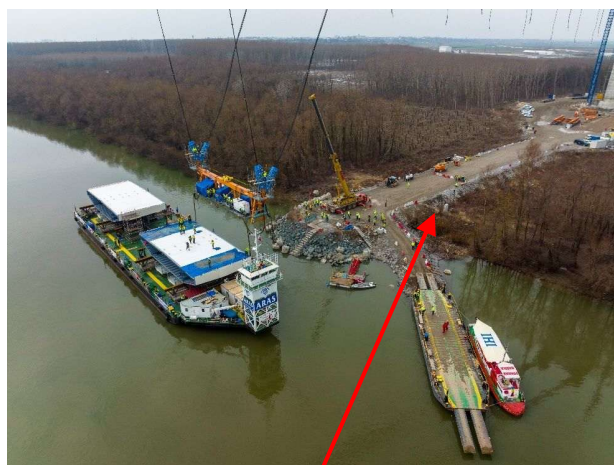
補剛桁製作工場の造船所全景



4-3. 架橋地点の地形的制約 ①



高水敷



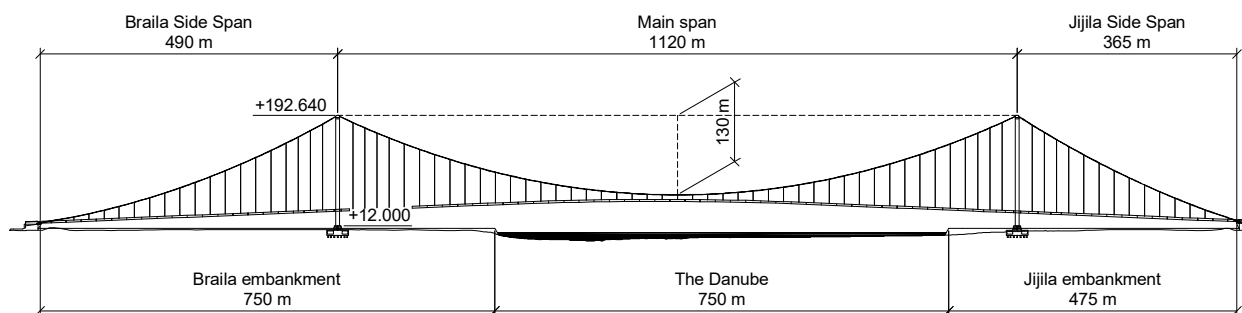
工事用道路

側径間範囲の高水敷：ドナウ川の水位変動により，冬季水面下に沈む。

⇒ 一年を通して主塔周辺に安定的にアクセスできるよう，下部工工事の段階より，アンカレッジから主塔基部に繋がる**工事用道路（盛土）**を造成。

4-3. 架橋地点の地形的制約 ②

中央径間：1120m



Braila 盛土区間

750m

ドナウ川

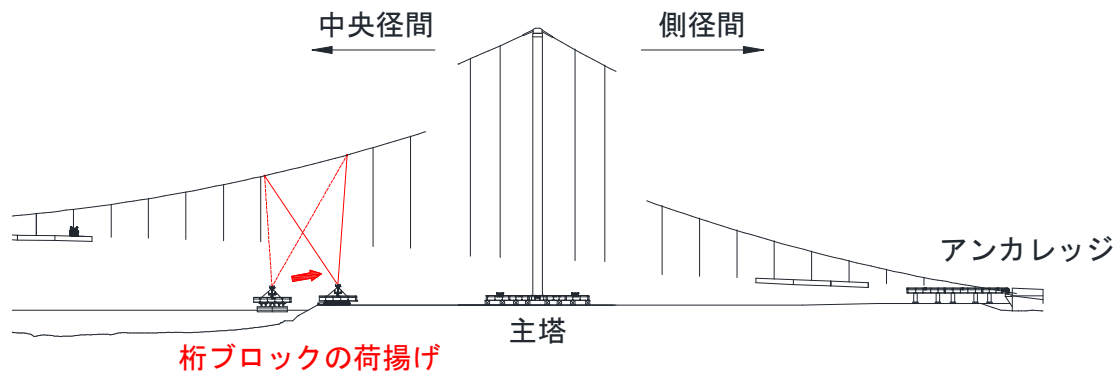
750m

Jijila 盛土区間

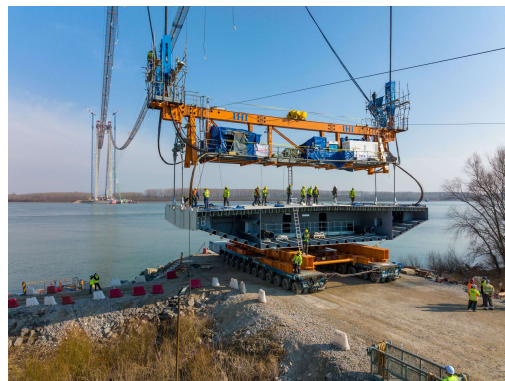
475m

↑ 橋梁支間長の**約 6 割**が工事用道路(陸上)に位置する。

4-4. 施工ステップ① 桁ブロックの荷揚げ

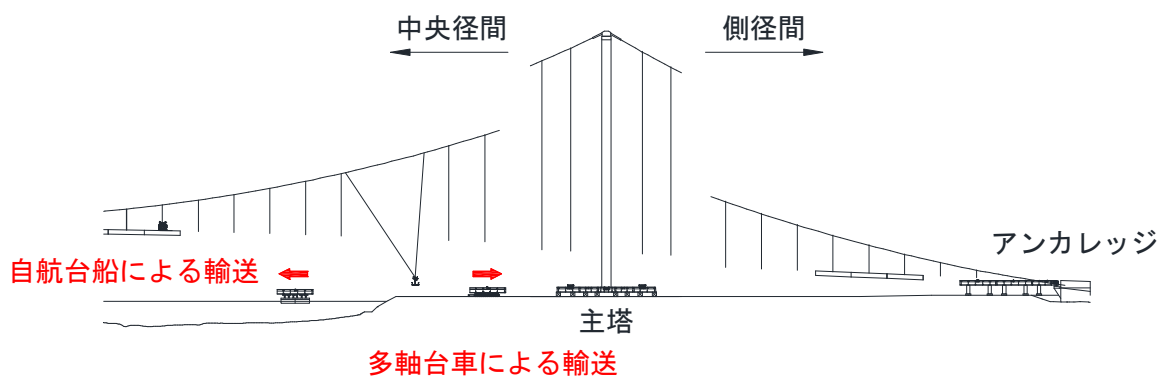


自航台船からの荷揚げ



多軸台車への搭載

4-4. 施工ステップ② 台船及び多軸台車による移動

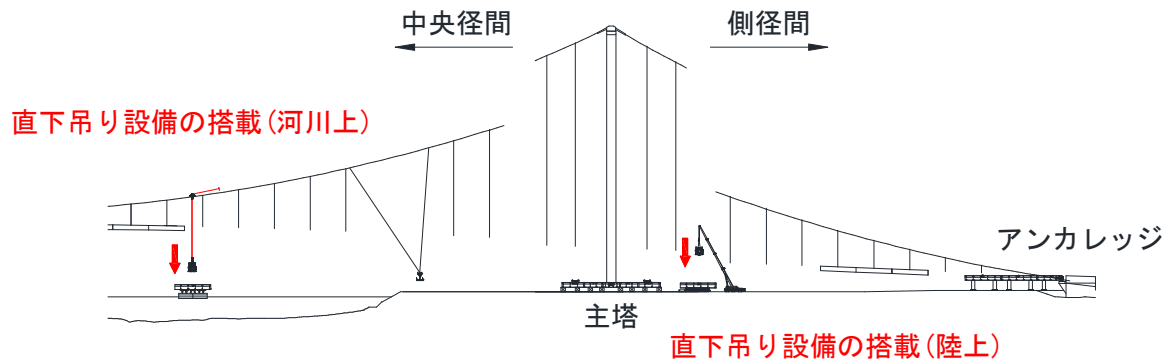


自航台船による輸送



多軸台車による輸送

4-4. 施工ステップ③ ジャッキユニットの桁への搭載

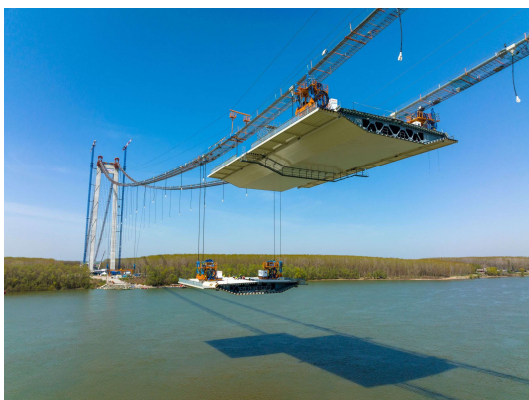
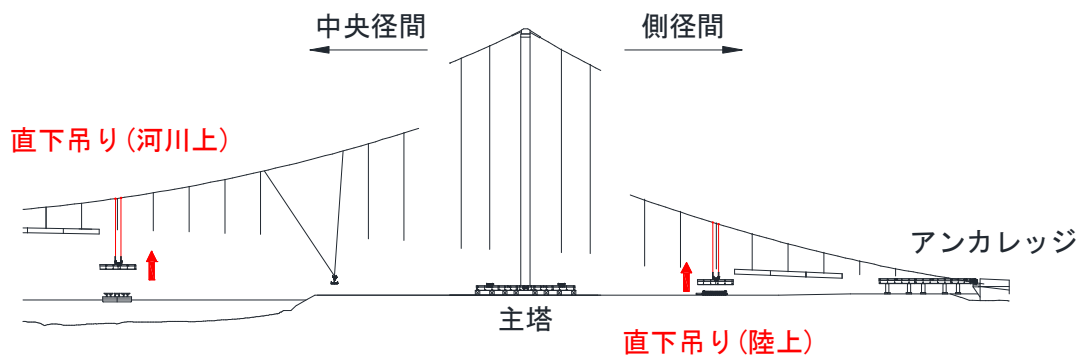


専用設備によるジャッキユニット降下



クレーンによるジャッキユニット吊上げ

4-4. 施工ステップ④ 河川及び陸上からの直下吊り

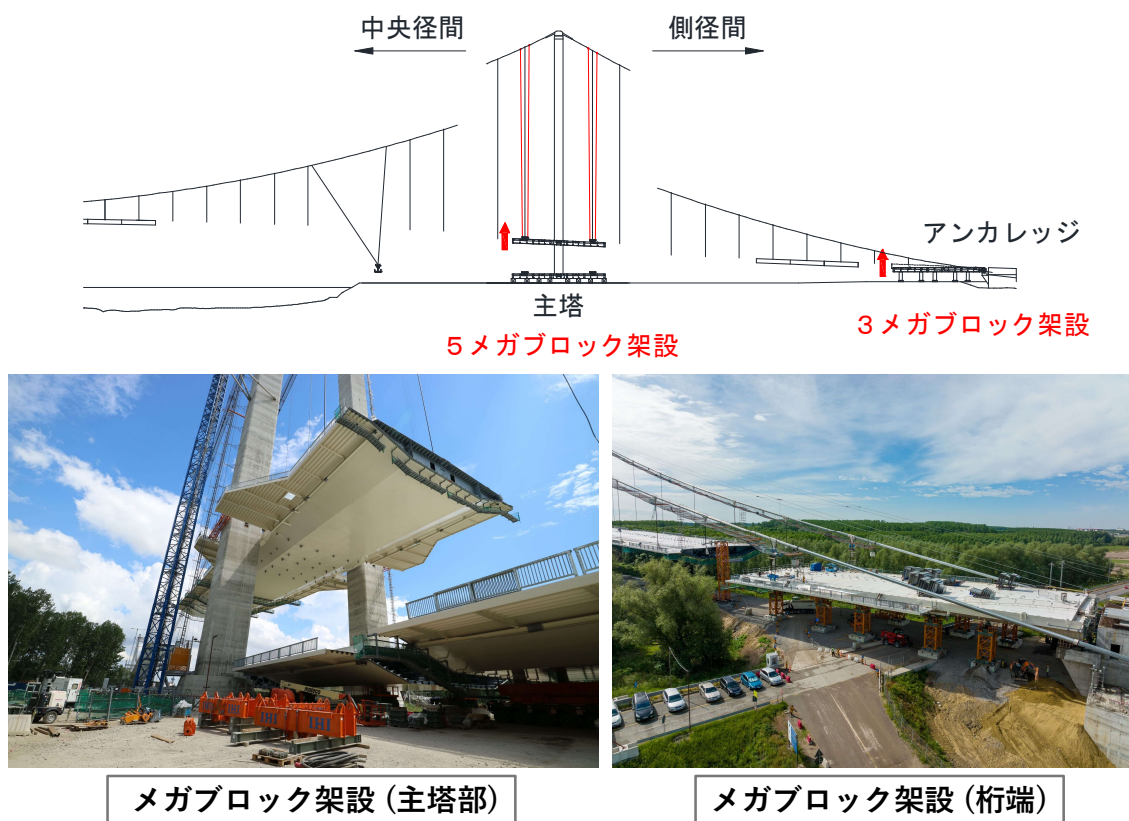


直下吊り(河川上)

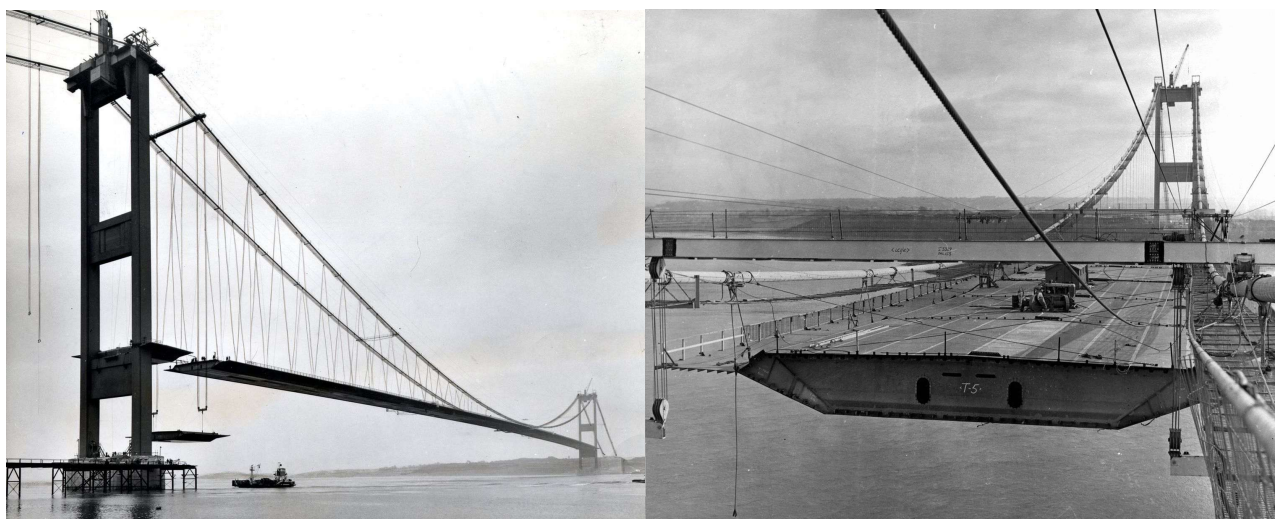


直下吊り(陸上)

4-4. 特殊部：主塔周り及び桁端のメガブロック架設



4-5. 箱桁式吊橋の歴史



出典: <https://www.bristolpost.co.uk>

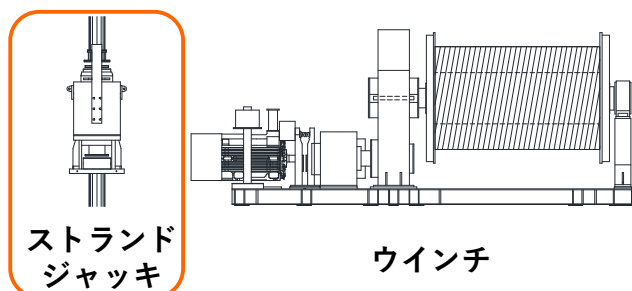
セバーン橋 (英国)

1966年竣工。世界で初めての流線形箱桁が採用された長大吊橋。

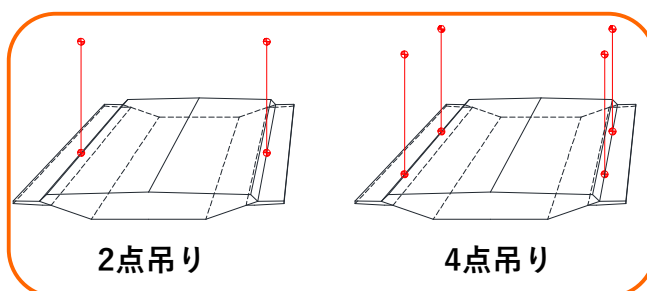
橋梁名	建設地	竣工年	最大 支間長 (m)	橋梁名	建設地	竣工年	最大 支間長 (m)
セバーン橋	イギリス	1966	988	イルティッシュ河橋梁	カザフスタン	2000	750
ニュー・リトルベルト橋	デンマーク	1970	600	安芸灘大橋	日本	2000	750
7月15日殉教者の橋 (第1ボスボラス橋)	トルコ	1973	1074	ニュー・カルキネス橋	アメリカ	2003	728
南海大橋	韓国	1973	404	潤揚長江大橋	中国	2005	1490
ハンバー橋	イギリス	1981	1410	豊島大橋	日本	2008	533
ファーティフ・スルタン・メフメト橋 (第2ボスボラス橋)	トルコ	1988	1090	李舜臣大橋	韓国	2012	1545
大島大橋	日本	1988	560	ハルダンゲル橋	ノルウェー	2013	1310
グジェムネスンド橋	ノルウェー	1992	623	蔚山大橋	韓国	2015	1150
アスコイ橋	ノルウェー	1992	850	オスマン・ガーズィー橋	トルコ	2016	1550
ヒューガ・クーステン橋	スウェーデン	1997	1210	ヤウズ・スルタン・セリム橋 (第3ボスボラス橋)	トルコ	2016	1408
青馬大橋	中国(香港)	1997	1377	ハロガランド橋	ノルウェー	2018	1145
グレートベルト・イースト橋	デンマーク	1998	1624	露梁大橋(第二南海大橋)	韓国	2018	890
白鳥大橋	日本	1998	720	南沙東大橋	中国	2019	1688
来島海峡大橋	日本	1999	1030	1915 チャナッカレ橋	トルコ	2022	2023
江陰長江大橋	中国	1999	1385	ブレイラ橋	ルーマニア	2023	1150

4-6. 補剛桁の吊形式の分類

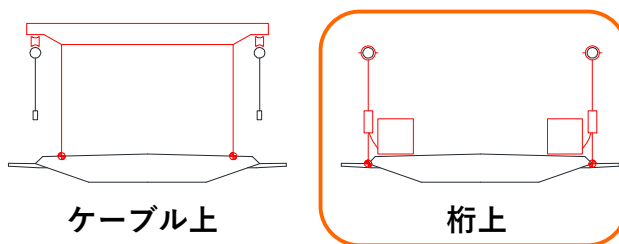
揚重機



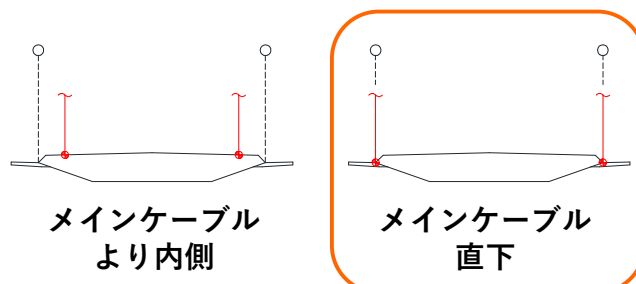
吊点数



吊上げ設備の搭載箇所

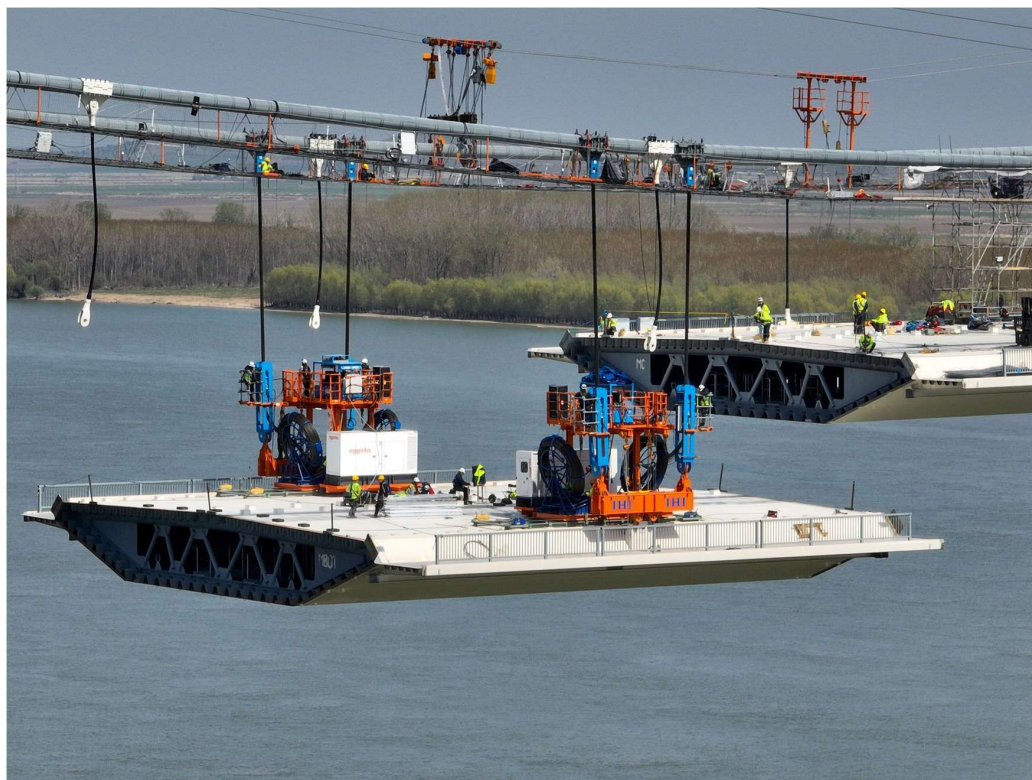


橋軸直角方向の吊点位置



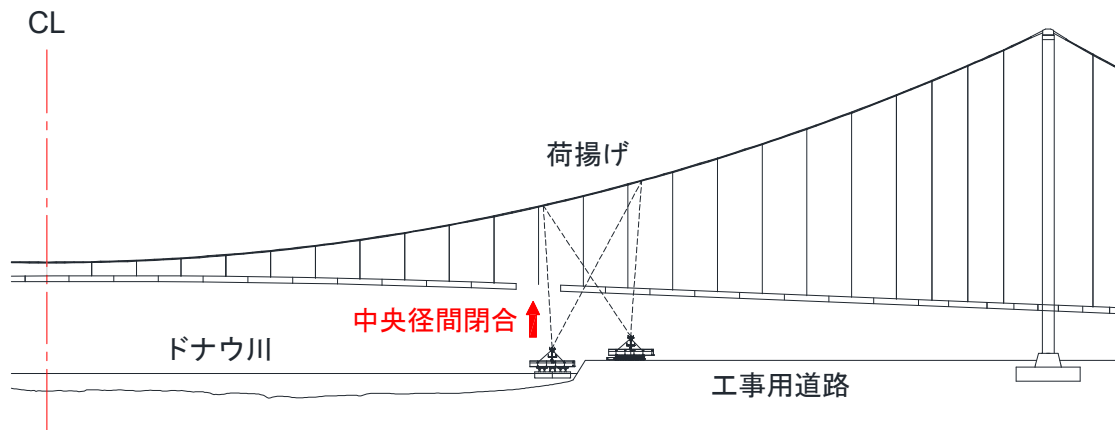
↑ **ブライラ橋**の補剛桁架設設備における区分

		ウインチ		ストランドジャッキ	
		2点吊り	4点吊り	2点吊り	4点吊り
メインケーブル上集約	吊点： メインケーブル直下	セバーン橋 (GBR:1966) 第2ボスボラス橋 (TUR:1988) イルティッシュ河橋梁 (KAZ:2000) 李舜臣大橋 (KOR:2012) 蔚山大橋 (KOR:2015) オスマン・ガーズィー橋 / 側径間 (TUR:2016) 第二南海大橋 (KOR:2018)	ニューリトルベルト橋 (DNK:1970)		第3ボスボラス橋 (TUR:2016)
	吊点： メインケーブルより内側	白鳥大橋 (JPN:1998) 安芸灘大橋 (JPN:2000) 豊島大橋 (JPN:2008)	第1ボスボラス橋 (TUR:1973) 南海大橋 (KOR:1973) ハンバー橋 (GBR:1981) 大島大橋 (JPN:1988) 来島海峡大橋 (JPN:1999) オスマン・ガーズィー橋 / 中央径間 (TUR:2016)	南沙東大橋 (CHN:2019)	青馬大橋 (HKG:1997) グレートベルト東橋 (DNK:1998) 江陰長江大橋 (CHN:1999) 潤揚長江大橋 (CHN:2005) ハルゲンダル橋 (NOR:2013) 1915 チャナッカレ橋 (TUR:2022)
補剛桁上集約	吊点： メインケーブル直下			ブライラ橋 / 水切り設備 (ROU:2023)	ニューカルキネス橋 (USA:2003) ブライラ橋 / 直吊り設備 (ROU:2023) リンツA26橋 (AUT:2023)
	吊点： メインケーブルより内側				



歴史的に少数派の**補剛桁側集約設備**を、なぜ採用したか？

4-7. 桁側集約設備を採用した背景 ①

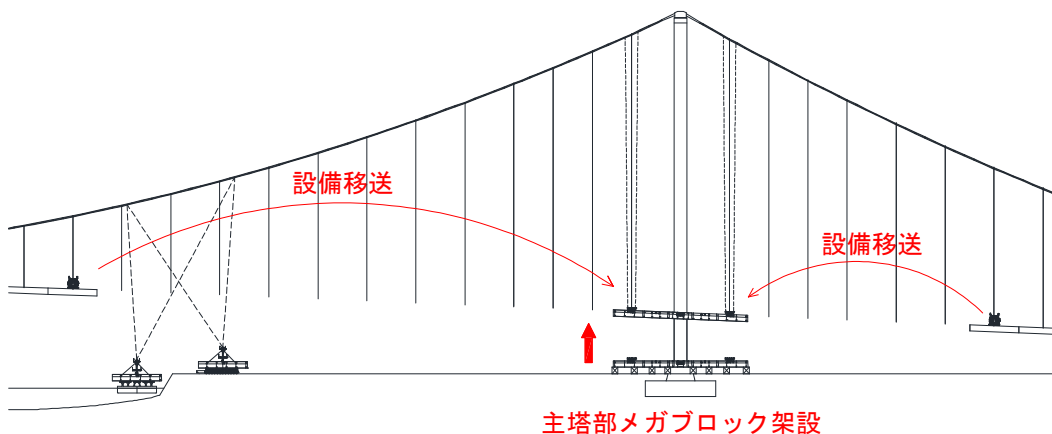


① 中央径間における閉合箇所

- 桁架設終盤まで桁の荷揚げが継続発生。
- 中央径間における桁架設の閉合は、主塔付近でなく荷揚げ地点で行われる必要があった。



4-7. 桁側集約設備を採用した背景 ②

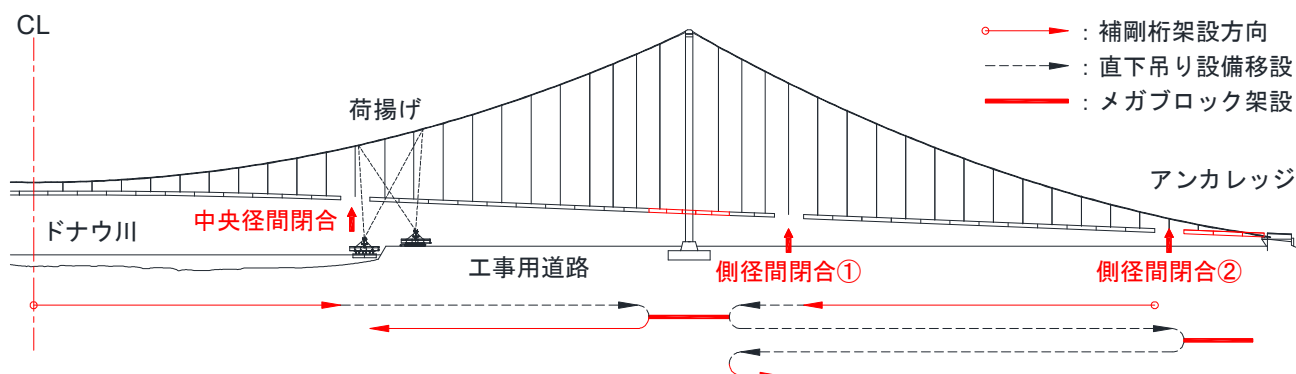


② メガブロック架設のための設備集約

- 桁架設中盤，主塔部においてメガブロック架設を実施。遠方から複数の桁架設設備を集約する必要があった。



4-7. 桁側集約設備を採用した背景 まとめ



➤ 桁架設の進行方向が一方向とならず、**桁吊上設備の長距離移設が頻繁に発生**.

⇒ **軽量で機動性に富む桁架設設備**の新規開発が必要.

参考：ケーブル上ガントリー型吊上設備例



オスマン・ガーズィー橋

➤ 建設国：トルコ（2016年完成）

➤ 揚重機：ウインチ

EPCコントラクター：IHIインフラシステム



1915 チャナッカレ橋

➤ 建設国：トルコ（2022年完成）

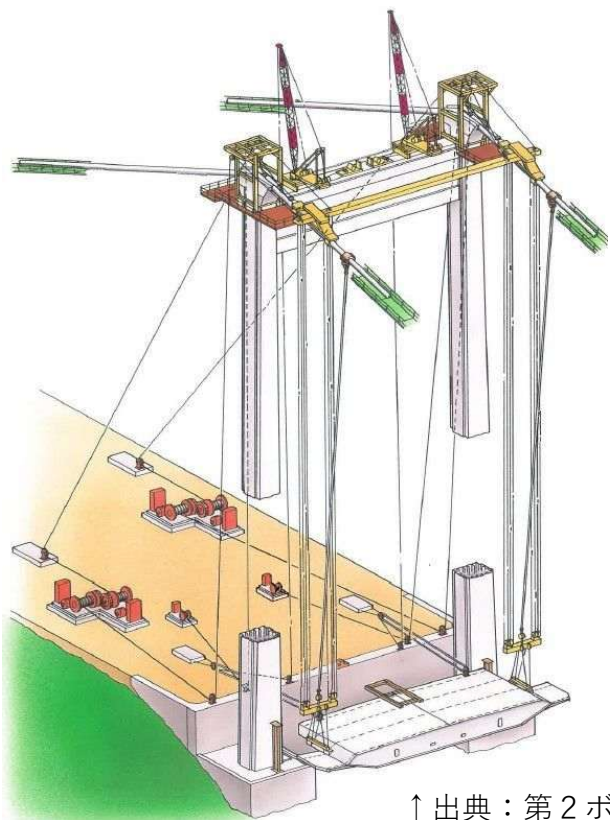
➤ 揚重機：ストランドジャッキ

<https://www.1915canakkale.com>

<https://www.dlteng.com>

↑ 吊上設備の長距離移設に、**多大な労力と時間**を要する.

4-8. スtrandジャッキの採用



ウインチ式 桁吊上げ設備

- 桁吊上げ用ウインチ・ガントリー
横行用ウインチは主塔基部に設置。
設備が大規模化.
- 広範囲にわたりウインチワイヤが
錯綜.
- ⇒ ブライラ橋では、**設備の集約が**
容易なストランドジャッキを選択

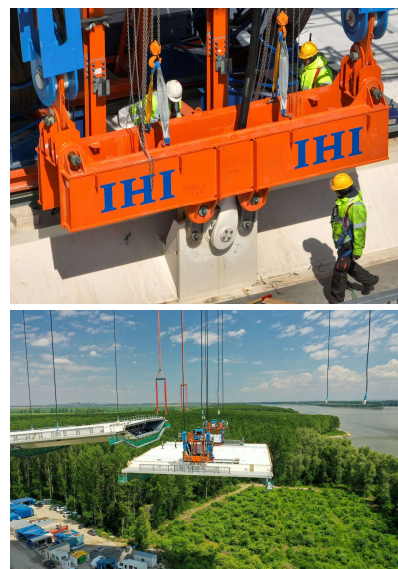
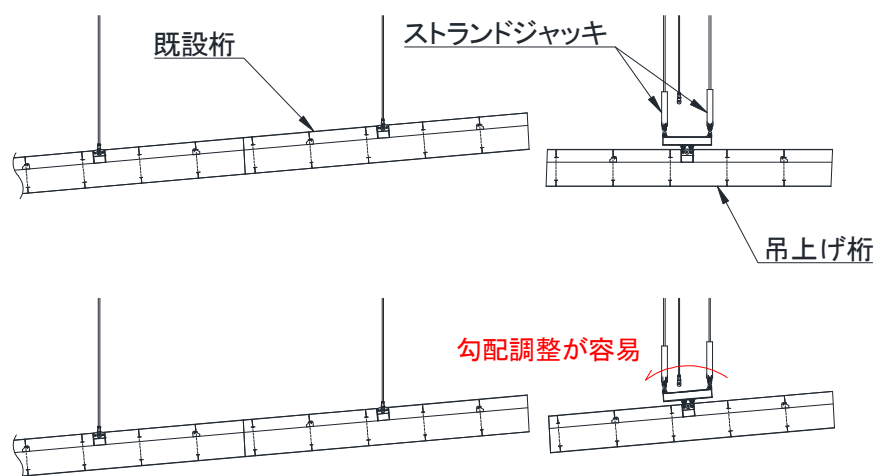
↑ 出典：第2 ポスボラス橋 工事写真集

4-9. 直下吊り設備 設備概要



- 設備主要構成品：2000kNストランドジャッキ 4 基，仮ケーブル
クランプ，ストランドリコイラー，電動ポンプ，発電機
- 上記構成品を鋼製フレームで**ユニット化**．小型の台船やトラック
で移送可能．**設備の迅速な移設**を可能とした．

4-10. 直下吊り設備 特徴



新規開発したストランドジャッキの桁側定着構造により，本体補強を最小限とした上で，迅速かつ繊細な縦断勾配の調整が可能。

⇒ ヒンジ連結作業の **高速化・安全性向上**

参考動画：直下吊り設備による水切り





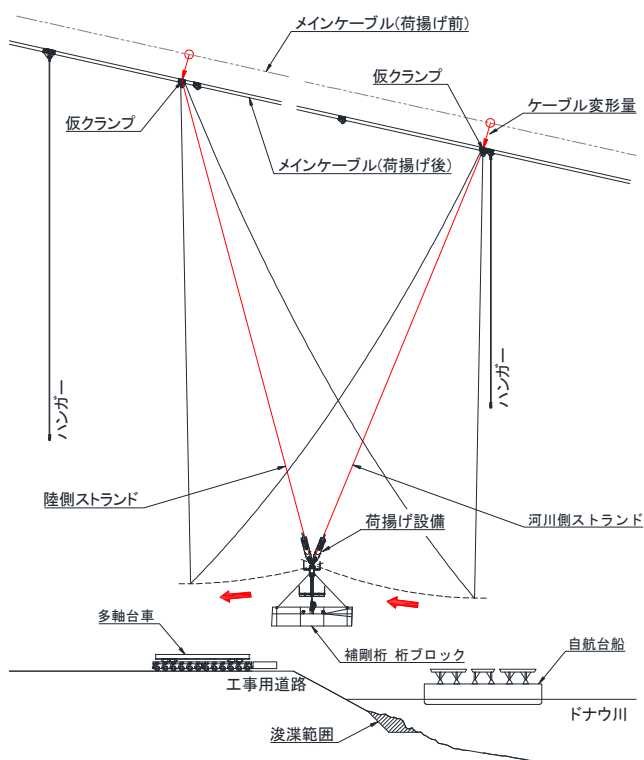
4-11. 荷揚げ設備 設備概要



- 設備主要構成品：3000kNストランドジャッキ 4 基，仮ケーブルクランプ，ストランドリコイラー，電動ポンプ，発電機
- **世界初の試み**として，ストランドジャッキを用いたスイング架設による補剛桁の荷揚げを実施.



4-12. スイング施工計画時の留意点

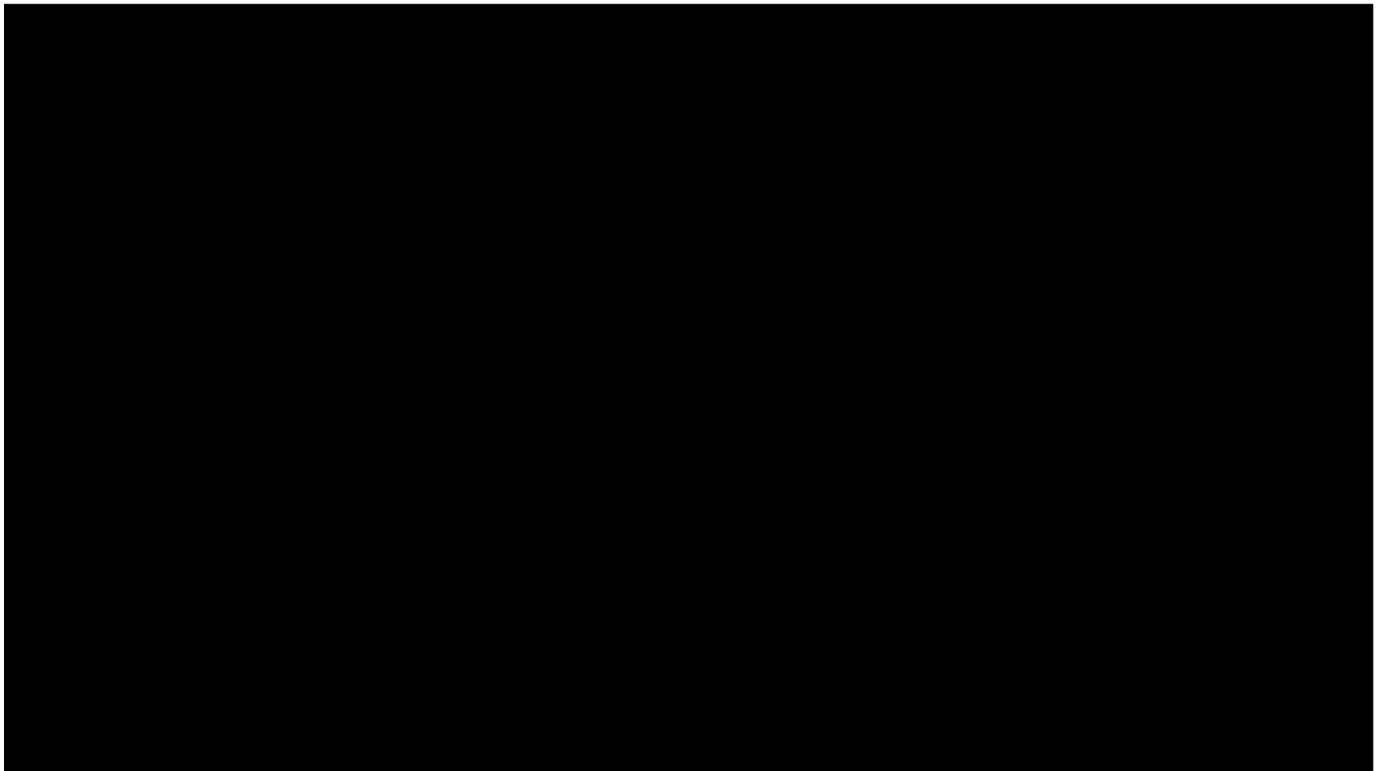


- 施工に先立ち、**全ステップのスイング架設の軌跡を検証**
 - ⇒ スtrand長の決定や仮クランプ位置、浚渫量の決定時に活用。
- **スイング軌跡に影響を及ぼす項目**
 - ✓ 桁架設の進行に伴うメインケーブルの変形（長期）
 - ✓ 荷揚げ時の載荷荷重によるメインケーブルの変形（短期）
 - ✓ 河川水位
 - ✓ 自航台船の吃水変動 等

4-13. 閉合後の全景



工事動画



おわりに

本橋の開通により、ルーマニア東部地域間の貨物流通の効率化およびEU域内の経済活性化に寄与。また、日本ルーマニアの戦略的パートナーシップ構築に貢献。

- **開通式典（2023年7月）**

ルーマニア：大統領，首相，運輸大臣など
日本：外務大臣政務官，在ルーマニア大使
EU現地代表，イタリア運輸省政務官など



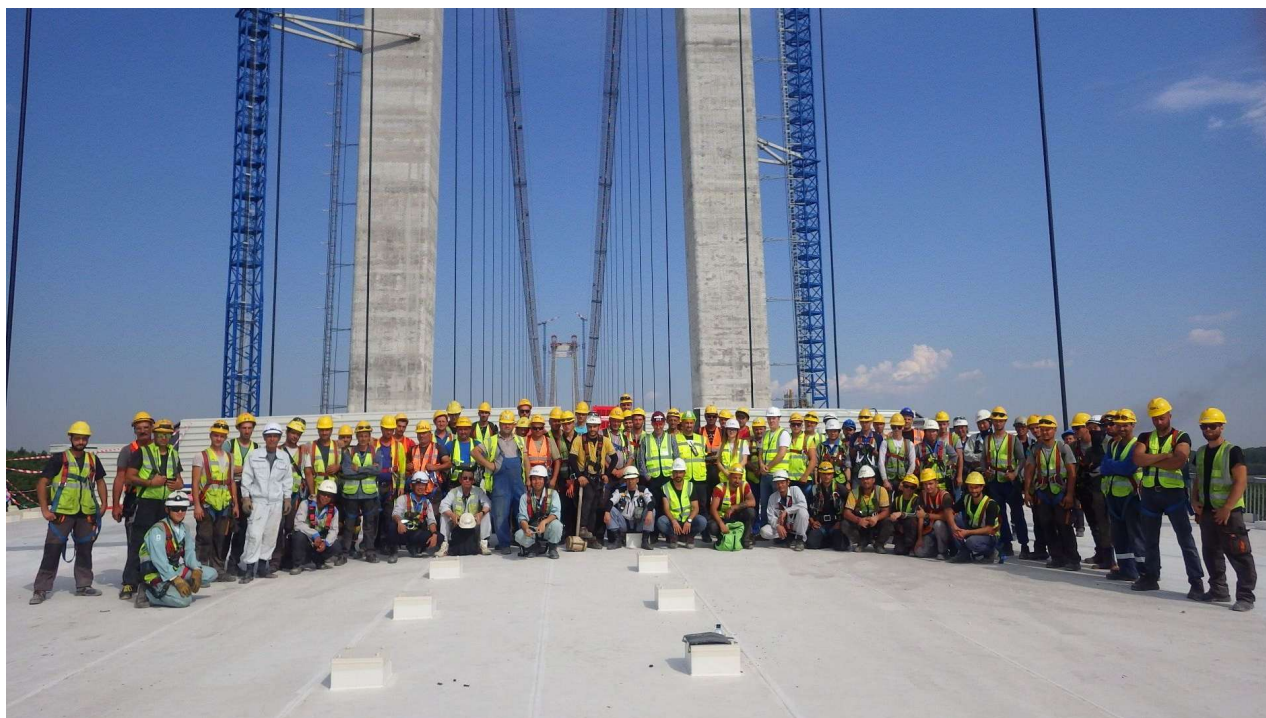
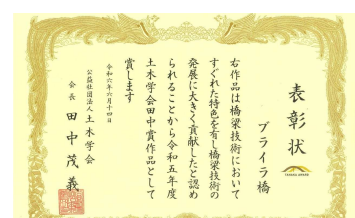
- **日本ルーマニア外交関係樹立100周年記念（2021年8月）**

両国の政府関係者がバージ船で現場を訪問
キャットウォークから100周年ロゴの垂れ幕で歓迎



- **表彰**

土木学会 田中賞作品部門 新設
日本鋼構造協会 業績賞



ご清聴ありがとうございました。