

本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.47 No.139 2023.1

本州四国連絡高速道路株式会社編集

EDITED BY HONSHU-SHIKOKU BRIDGE EXPRESSWAY COMPANY LIMITED

本四技報 第 139 号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.139

【巻頭言】

やっぱり本四高速！……………竹内政彦… 1
The world counts on HSBE!

【技術論文】

因島大橋の耐震性能照査……………金田崇男・西谷雅弘… 2
Seismic performance verification of Innoshima Bridge

本州四国連絡高速道路における暫定2車線区間への
中央分離帯ワイヤロープ式防護柵設置……………村上博基・吉丸直明・井上晃祐… 9
Installation of wire rope-type protective fences in median strip for temporary two lane sections
on Honshu-Shikoku Expressway

ゆめしま海道「岩城橋」の工事報告……………木村一也…14
Construction Report of Iwagi Bridge, Yumeshima Kaido

【技術ニュース】

第11回国際吊構造橋梁管理者会議を開催しました……………西谷雅弘…38
The 11th ICSBOC was held in Kobe, Japan

海外の長大橋建設状況……………WANG HONGXIN…43
Overseas long-span bridge construction status

2021年度塗装工学編集委員長賞受賞……………大谷康史…46
2021 Journal of Japan Coating Technology Association Editor-in-Chief Award

国土技術研究会自由課題最優秀賞受賞……………金田泰明…46
HSBE member won the best award in MLIT Technical Conference

【文献紹介】

本州四国連絡橋関連技術文献紹介……………47
Technical articles related to Honshu-Shikoku Bridges

本州四国連絡高速道路における暫定2車線区間への 中央分離帯ワイヤロープ式防護柵設置

Installation of wire rope-type protective fences in median strip for temporary two lane sections on Honshu-Shikoku Expressway



写真-1 中央分離帯ワイヤロープ式防護柵設置(設置前)

Photo 1 Installation of wire rope-type protective fences in median strip (before installation)



写真-2 中央分離帯ワイヤロープ式防護柵設置(設置後)

Photo 2 Installation of wire rope-type protective fences in median strip (after installation)



写真-3 鋼管基礎杭打込み

Photo 3 Driving of steel pipe piles



写真-4 ワイヤロープ定着

Photo 4 Fixing of wire rope

ゆめしま海道「岩城橋」の工事報告

Construction Report of Iwagi Bridge, Yumeshima Kaido



写真-1 完成写真（全景）

Photo 1 Completed photo (overall view)



写真-2 供用前の照明設備等の点検（岩城島 3P 側から生名島 4P 側を望む）

Photo 2 Inspection of lighting facilities, etc. before opening to traffic
(view of Ikina Island from Iwagi Island)

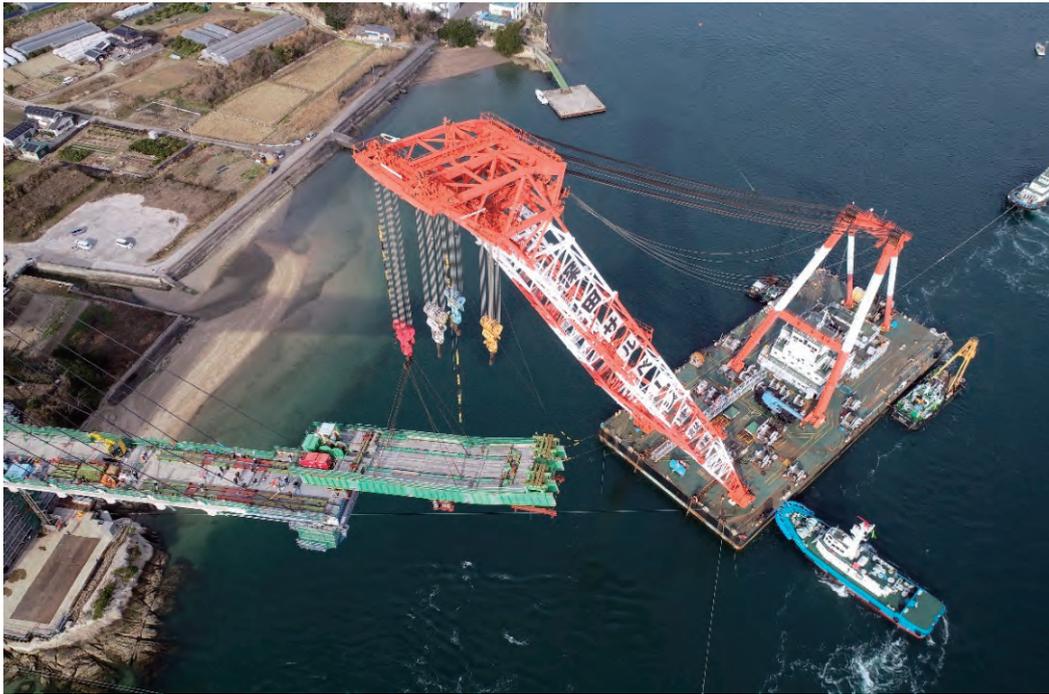


写真-3 FC 船による橋上クレーンの架設（岩城島 3P 側）
Photo 3 Installation of a crane for erection by a floating crane barge
(Iwagi Island, 3P side)



写真-4 鋼桁の張り出し架設中（生名島 4P 主塔側から岩城島 3P と積善山を望む）
Photo 4 Overhanging erection method of steel bridge
(View of Iwagi Island and Mt. Sekizenzan from Ikina Island)

やっぱり本四高速！

The world counts on HSBE!

経営計画部長 竹内 政彦

Masahiko Takeuchi

【はじめに】

JB本四高速グループでは2022年度から2024年度までの3年間を対象として、新たに「行動計画2022-2024」を策定しました。この計画では、重要な社会インフラである本四高速道路の持つ可能性を最大限発揮させ、持続可能な発展に貢献するため、インフラ経営のリーディングカンパニーを目指して次世代への挑戦に取り組むこと、としています。行動計画を含む様々な業務を確実に実施していくために必要なことは何でしょうか？本稿では私が個人的に考えているイメージについて少し述べたいと思います。

【必要なことはなに？】

業務を確実に実施していくために何が必要となるのかは色々な考えがあるかと思います。私は、社員一人一人が職務に満足し誇りをもって取り組むことによって、個々のパフォーマンスを最大限に発揮し、よって成果の最大化につながるのではないかと考えています。では、どうすれば社員一人一人が満足と誇りをもって職務に取り組むことが出来るのでしょうか？これもいろいろ考えられるかと思いますが、例えば、職場の雰囲気が良い、給与や福利厚生などが充実している、社会から高く評価される、といったことではないでしょうか。

本稿は本四技報の巻頭言ですので、社会から高く評価されるためになすことは？という観点から書き進めたいと思います。

【社会から評価されるために】

私は瀬戸内地域と離れた地方で生まれ育ちました。当時は交通や情報などのネットワークといったものは十分整備されておらず、そのため瀬戸内は遠く、関心などもほとんど持ち合わせていませんでした。にもかかわらず、就職先に本州四国連絡橋公団（当時）を選んだのは、本四架橋プロジェクトの「世界最大」「世界初」といった言葉に無邪気に惹かれたからでした。

最初の配属先は坂出工事事務所でした。当時は瀬戸大橋建設の最盛期を迎えていた時代であり、地域の方や地元自治体、報道なども含めて大変な期待をひしひしと感じました。そうすると技術もなにもなく、社会の右も左もわからない新米社会人すらも舞い上がって「社会の期待に応えねば」という使命感に燃えたのです。もちろん個人としては、何か素晴らしい結果を残したということはないのですが、当時の新米職員として出来る最大のパフォーマンスを発揮できたのではないかと手前味噌ながら今も考えています。

瀬戸大橋の供用開始頃のポスターには「夢だった。夢じゃなかった！」と大きく書かれていました。この言葉は今も強く心に残っています。このように、地域の夢をかなえることによって、社会からも高く評価されるのではないのでしょうか。

そんな社会の夢にほんの少しでも貢献できたという思いは、それ以降現在までの私の活力となっています。

【「当たり前」を守りつつ】

そんな「夢だった」瀬戸大橋をはじめとする本州四国連絡橋も供用開始から長い期間が過ぎました。橋があることを前提に暮らしていることが当たり前になっています。私たちの使命はまず、このあたり前の生活を守っていくために、日々の保守や管理に全力を尽くすことにあります。現在の本四高速はこの位置にいるのだろうと思います。でも、それだけで良いのでしょうか？

私たちがこれからも気持ちよく働き、最大のパフォーマンスを発揮し続けるためには、社会の新たな期待に応えることが必要ではないのでしょうか。あたり前のことだけでは新たな期待を生むことは難しいのではないかと思います。

【新たな「夢だった。夢じゃなかった！」を】

いま私たちは社会からどのようなことを期待されているのでしょうか？そしてそのニーズに対してどのような取組を進めていけば、その期待に応えていくことが出来るのでしょうか？

まず、瀬戸内企業として、地域の様々な課題を理解し、地域の方々とその解決に取り組むことがあげられるかと思えます。瀬戸内地域に住む人たちとともに課題に取り組むことによって信頼を得られるのではないのでしょうか。

また、世界有数の長大橋梁群を管理する技術者集団として、国内はもとより海外からの技術的な期待に応えることもあげられるかと思えます。技術支援を通じてオンリーワンの長大橋技術企業であることを広くPRし、困ったときは本四高速に聞けと言われるくらい、期待される会社を目指すべきではないのでしょうか。

このような活動を通じて、国内外から高く評価され、社員個々のモチベーションが上がり、高いパフォーマンスにつながるものと考えています。社会からの期待と信頼を得て、社会に夢と活力を還元できるそんな企業になりたい。そして「やっぱり本四高速ってすごいよね！」って言ってもらえる企業であり続けたい。そのような企業を目指し、本四高速グループ一丸となって挑戦していきましょう。

因島大橋の耐震性能照査

Seismic performance verification of Innoshima Bridge

金田 崇男 Takao Kaneda

企画部 企画課長代理
(前 長大橋・技術部
総括・耐震・耐風グループサブリーダー)

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

長大橋・技術部
次長 兼 総括・耐震・耐風グループリーダー

概要

因島大橋は、今後30年間に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率が26%未満の地域にある長大吊橋であるが、代替路のない海峡部橋梁であることから、橋の重要度等を鑑み、令和7年度までに耐震補強を完了させる計画である。

本文は、因島大橋の耐震性能照査について報告する。耐震性能照査の結果、側径間部の補剛トラスの主構、横トラス、エンドリンク、エンドストッパー、ウインド杓、ウインドタングの損傷、センターステイの破断、道路桁支承及び自歩道桁支承の損傷、補剛トラス桁と主塔及びアンカレイジの衝突と多数の部材が損傷することがわかった。

Innoshima Bridge is a long-span suspension bridge located in an area with a less than 26 percent probability of the occurrence of large earthquake with a seismic intensity level of Lower 6 or higher in coming 30 years.

This paper reports on the seismic performance verification of the Innoshima Bridge. The results revealed damage to the main truss, transverse truss in the side span, damage to end links, end stoppers, wind shoes, and wind tongues, road girder bearings and bicycle and pedestrian track girder bearings, rupture of the center-stay cable, and collision of stiffened truss with main tower and anchorage.

1. はじめに

因島大橋は、今後30年間に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率が26%未満の地域にある長大吊橋であるが、代替路のない海峡部橋梁であり、橋の重要度等を鑑み、令和7年度までに耐震補強を完了させる計画である。

当初の設計にあたっては、支間200mを超えるため道路橋示方書(以下「道示」という。)の適用外であったことから、本四公団(当時)が独自に設定した本四耐震基準¹⁾を適用している。

ただし、この基準では現在の道示耐震設計編²⁾に規定されているレベル2タイプII相当の地震が考慮されていない。さらに、吊橋は一般に耐震性能は高いとされている長周期構造物であるが、新たに設定した設計地震動が大規模であることから、ある程度の補強が必要になることが予想された。

耐震性能照査の結果、側径間部の補剛トラスの主構、横トラス及び横構、エンドリンク、エンドストッパー、ウインドタングの損傷、中央径間部のセンターステイの

破断、道路桁支承、自歩道桁支承の損傷、主塔及びアンカレイジへの補剛トラス桁の衝突と、多くの損傷が生じることがわかった。本文は、因島大橋の耐震性能照査について報告するものである。

2. 橋梁概要

因島大橋は、西瀬戸自動車道の一部を構成する海峡部長大橋で、昭和58年に供用を開始した、向島と因島の間に架かる中央径間770m、側径間250m、橋長1,270mの3径間2ヒンジ補剛トラス吊橋である。

補剛トラス桁は上段に自動車道路、下段に自転車歩行者道があるダブルデッキ構造である。タワーリンクは各主塔位置の側径間側・中央径間側に、エンドリンクは各アンカレイジ位置に各2基設置されている。ウインド杓及びウインドタングは、タワーリンク及びエンドリンク設置位置に各1基設置されている。

橋梁概要を表-1に、一般図を図-1及び図-2に示す。

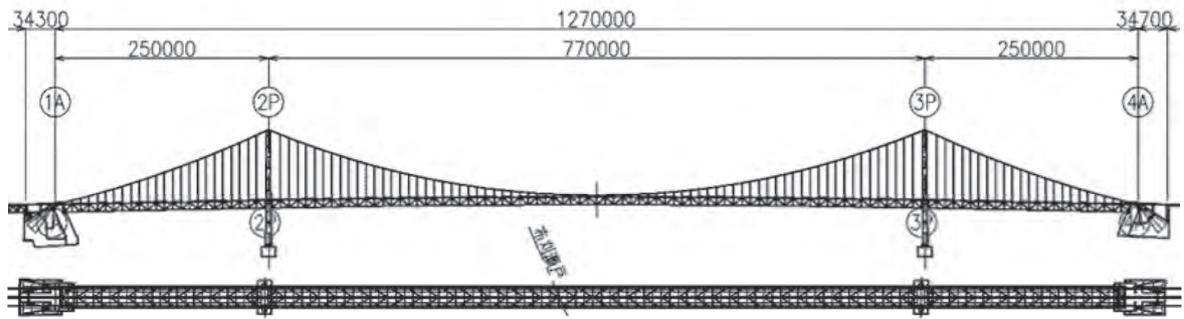


図-1 橋梁一般図

Fig.1 General view

表-1 橋梁概要

Table 1 Outline of bridge

橋名	因島大橋
形式	3径間2ヒンジ補剛トラス桁吊橋
橋長	1,270m
支間割	250m+770m+250m
平面線形	直線
縦断線形	側径間2%直線, 中央径間1%放物線
横断線形	2%直線勾配
床版形式	鋼床版
下部工形式	直接基礎(橋台・主塔)
適用耐震基準	耐震設計基準・同解説(本四公団, 昭和52年)

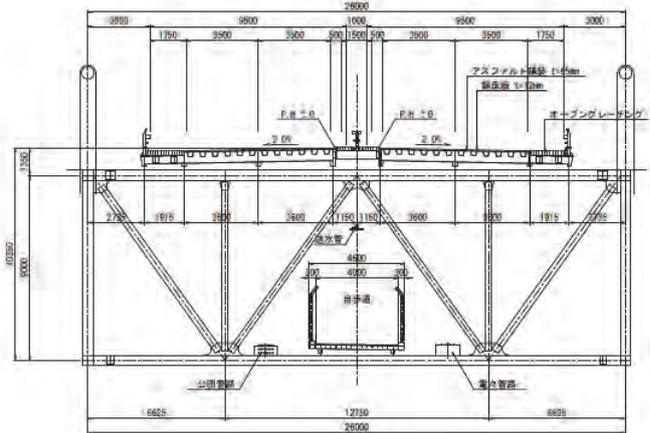


図-2 補剛トラス桁断面図

Fig.2 Cross section of stiffened truss

3. 耐震性能照査

3.1 入力地震動

因島大橋の耐震性能照査に用いた大規模地震動の概略は以下のとおりである³⁾。大規模地震動は、因島大橋の架橋地点の地盤構造、近隣の断層等を考慮した断層モデルから求め、工学的基盤 $V_s=0.7\text{km/s}(2P)$ 、 $1.4\text{km/s}(3P)$ で定義したものである。地震動の種類は、東南海・南海地震（モーメントマグニチュード（以下「M」という。）8.6）、中央構造線（石鎚-伊予灘断層）による地震（M7.5）、想定芸予地震（M7.3）、伏在断層（地表に現れていない断層）による地震（架橋地点直近で $M_j 6.8$ 相当を想定）の4種類の地震を考慮することとした。

ただし、因島大橋の架橋位置の関係から、中央構造線による地震の影響は小さいため、実際に考慮した地震は、東南海・南海地震1波、想定芸予地震2波、伏在断層による地震（逆断層2波、横ずれ断層2波）の3種類に対する計7波である。

解析に用いる入力地震動は、基礎底面位置の地震動とし、先に定義されている大規模地震動に対し、構造物と地盤の動的相互作用の影響を考慮するため地盤-基礎構造物を反映した二次元FEMモデルを用い、橋軸方向と橋軸直角方向で算出した。

耐震性能照査に用いた入力地震動の2P基礎底面におけるそれぞれの加速度応答スペクトルを図-3に示す。

いずれの位置においても想定芸予地震の影響が大きいことがわかる。なお、建設時の地震動強度は、下部構造支持基盤面上で180galの地震動を考慮している。

地震動の入力は、東南海・南海地震及び想定芸予地震では、地震動の3次元的な挙動を考慮するため、水平2方向、鉛直1方向の3方向同時入力とした。伏在断層を想定した地震波は、橋軸方向と橋軸直角方向に鉛直方向を組み合わせた2方向にそれぞれ入力した。

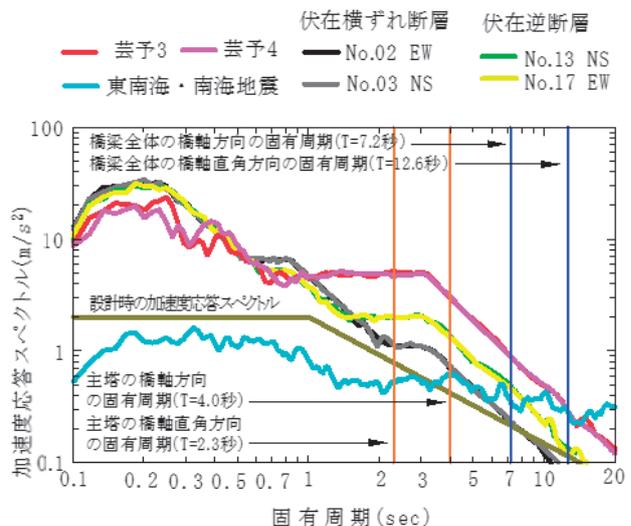


図-3 入力地震動の加速度応答スペクトル (2P)

Fig.3 Acceleration response spectrum of input seismic motions (2P)

3.2 解析モデル

耐震性能照査では、地震時の挙動を正確に再現することを目指し、3次元骨組モデルにより、検査路、付帯設備を除く全ての部材をモデル化した。表-2 にモデル化に用いた要素及び減衰定数を示す。また、以下で主要部材のモデル化について概説する。

(1) 補剛トラス桁、主塔

補剛トラス桁及び主塔は、軸力変動の影響を考慮できるようにファイバー要素でモデル化した。材料構成則は2次勾配が、E/100のバイリニアモデル（移動硬化則）とした（図-4）。ここで、局部座屈強度が全強でない構成板要素では、圧縮側降伏応力度を局部座屈強度に低減した非対称バイリニアモデルとした。

(2) 主ケーブル、ハンガーロープ、センターステイ

主ケーブルは、幾何学的非線形性が考慮できるように、要素を3分割したケーブル要素でモデル化した。応力ひずみ関係は、圧縮側と引張側で同じとするが、幾何学的非線形性により、ケーブルのたわみを考慮できる。ハンガーロープは、1ヶ所あたり2本のロープが桁側で4点で固定されているが、8分割した1本のケーブルでモデル化した。センターステイは、ケーブルの破断耐力で剛性低下するスリップモデル（図-5）でモデル化し、破断を疑似的に考慮した。

表-2 各部材のモデル化と減衰定数

Table 2 Analytical model and damping constant for each member

部材	モデル化	減衰定数	
トラス部材	ファイバー要素	1%	
主塔	ファイバー要素	1%	
道路桁（鋼床版）	線形はり要素	2%	
主ケーブル	ケーブル要素	1%	
ハンガーロープ	ケーブル要素	1%	
センターステイ	非抗圧ばね要素	1%	
アンカレイジ	線形はり要素	0%	
塔頂サドル	線形ばね要素	0%	
フーチング	線形はり要素	0%	
剛部材	線形はり要素	0%	
支承構造	道路桁支承	ばね要素	0%
	ウインド沓	ばね要素	0%
	エンドストッパー	衝突ばね要素	0%
	タワーリンク・エンドリンク	トラス要素	0%
基礎-地盤ばね	ウインクラーモデル	10%	

(3) リンク沓、ウインド沓・ウインドタンク

リンク沓（エンドリンク、タワーリンク）は、接合部が全方向ピン接合のトラス要素でモデル化した（図-6）。写真-1に示すウインド沓・ウインドタンクは、端支点・中間支点上で橋軸直角方向の移動を拘束しており、ウインド沓の遊間量と剛性を考慮したギャップ要素（線形ばね）で左右両側をモデル化した（図-7）。ウインドタンクは剛部材とした。

(4) エンドストッパー

エンドストッパーは、側径間の主構トラスとアンカレイジの衝突を防ぐためRC構造に設置されたV字形のゴムが、側径間の端横トラス下弦材から張り出した突起を挟み込むように構成されており（写真-2、図-8）、衝突ばね要素（非線形弾性のスリップモデル）でモデル化した（図-9）。エンドストッパーと主構トラス間の遊間は±260mmであり、ゴムに衝突後はゴムの圧縮剛性により橋軸方向の相対変位に抵抗する。圧縮変形は文献4)を参考に設定した。エンドストッパーの非線形性を図-10に示す。

(5) 道路桁、自歩道桁

道路桁は、主桁毎に梁部材でモデル化し、鋼床版は、鋼床版のせん断剛性と等価となるように換算したトラス部材でモデル化した。自歩道桁は単径間の単純桁であるので、2主桁を1本の梁要素でモデル化した。

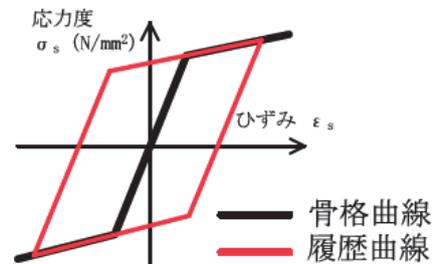


図-4 鋼材の応力度-ひずみ関係（バイリニアモデル）

Fig. 4 Stress-strain curve for steel members (bi-linear model)

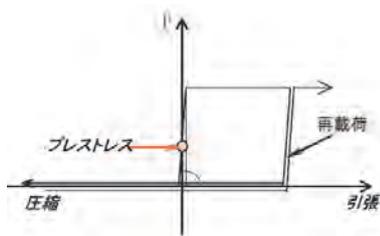


図-5 センターステイのスリップモデル

Fig. 5 Slip model for center-stay cable

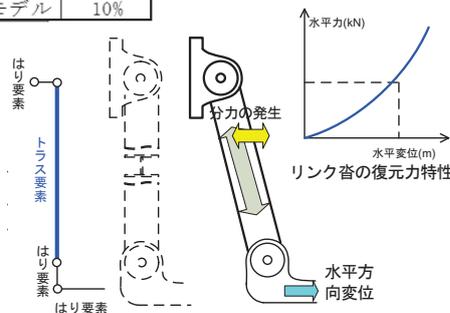


図-6 リンク沓の復元力

Fig. 6 Restoring force characteristics of link shoe

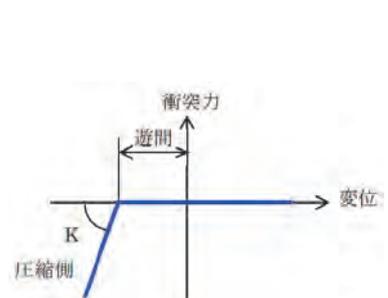


図-7 ウインド沓のモデル化

Fig. 7 Displacement property of wind shoe



写真-1 ウインド沓・ウインドタング
Photo 1 Wind shoe and wind tongue



写真-2 エンドストッパー
Photo 2 End stopper

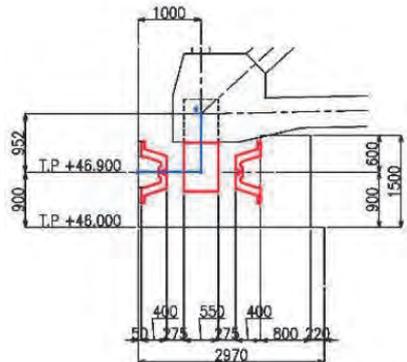


図-8 エンドストッパー側面図
Fig. 8 Side view of end stopper

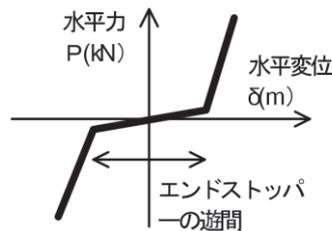


図-9 エンドストッパーのモデル化
Fig. 9 Slip model for end stopper

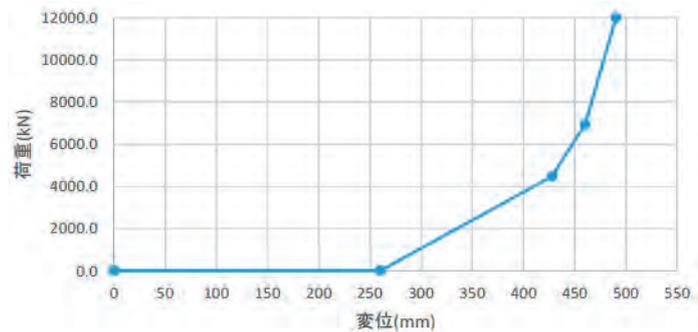


図-10 エンドストッパーのP- δ 関係
Fig. 10 Displacement property of end stopper

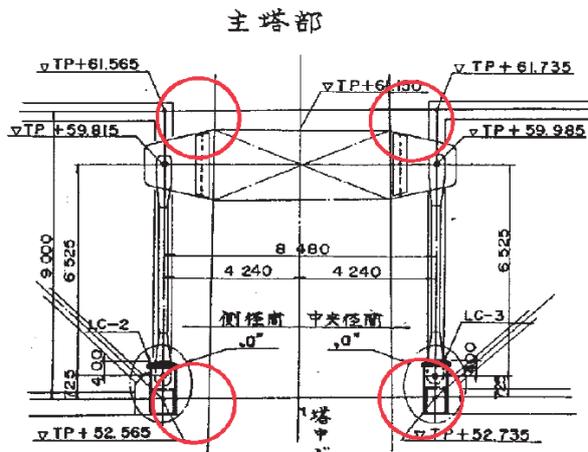


図-11 補剛トラス桁と主塔の衝突位置
Fig. 11 Collision position of stiffened truss and main tower.

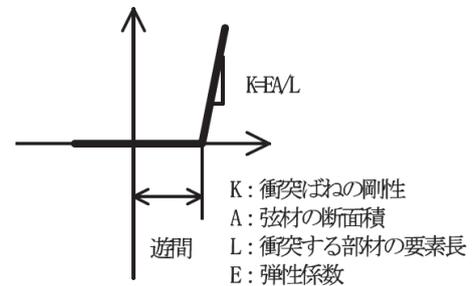


図-12 衝突ばねの骨格曲線
Fig. 12 Skeleton curve of collision model

(6) 補剛トラス桁の衝突

橋梁全体系の解析の結果、補剛トラス桁と主塔間に遊間以上の相対変位が生じていることがわかったことから(図-11)、補剛トラス桁と主塔及びアンカレイジの衝突を考慮できる衝突ばねでモデル化した(図-12)。

3.3 解析手法

本橋は可とう性に富む構造物であり、幾何学的非線形性の影響を取り込むため、地震応答解析は幾何学的非線形と材料非線形を同時に考慮できる複合非線形解析(弾塑性有限変位解析)で行った。

4. 照査結果

4.1 照査方針

補剛トラス桁及び主塔の鋼部材の照査は、ファイバー要素のひずみによる照査と道示鋼橋編³⁾の軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の安定照査式を併用した。

リンク沓、ウインド沓・ウインドタング、道路桁支承、自歩道桁支承は、それらを構成する部材の中で最も低い降伏応力相当の耐力及び移動可能量で、エンドストッパーは、エンドストッパーと端横トラス下弦材の橋軸方向の相対変位に着目し、遊間量及び衝突後の反力で照査

した。

主ケーブル、ハンガーロープ、センターステイは軸力による降伏、塔頂サドルはサドル上のストランドの滑り、主塔アンカーボルトはせん断応力度及び浮き上がり、基礎は鉛直支持力とフーチング断面力で照査した。

4.2 耐震性能照査結果

照査を満足しない部材、照査項目、地震動を表-3に示す。センターステイ、補剛トラス桁、エンドリンク、ウインド杓・ウインドタンク、エンドストッパー、道路桁支承、自歩道桁支承の損傷と、補剛トラス桁と主塔及びアンカレイジの衝突など多数の部材で損傷が生じる結果となった。また、損傷の原因となる主たる地震動は、芸予地震である。

損傷位置の概要図を図-13に示す。道路桁支承及び自歩道桁支承について橋梁全体を、それ以外の補剛トラス桁等については、1A～中央径間中央位置のものを代表で示している。

(1) 補剛トラス桁

主構の上下弦材は、側径間のアンカレイジ側に損傷が

集中する結果となった。横トラスの損傷位置を図-14に示す。側径間端部の横トラスの損傷は、アンカレイジと補剛トラス桁の衝突とウインドタンクからの反力によるものである(図-15)。また、側径間中間部の損傷例を図-16に示す。これは、道路桁支承の固定支持部直下での損傷である。

(2) 道路桁支承及び自歩道桁支承

道路桁支承は、横トラス端部で橋軸直角方向、固定支持部で橋軸方向、可動支持部で鉛直方向の耐力照査を満足しなかった。固定支持部の橋軸方向及び鉛直方向の移動を拘束する支承のピンチプレートの耐力が極端に小さいためである。可動支持部についてはG1桁の損傷が多い。自歩道桁支承は、横トラス端部及び主塔部において耐力照査を満足しなかった。

(3) エンドリンク、ウインド杓・ウインドタンク

エンドリンクは、1A及び4Aで軸力による引張、1Aで軸力による圧縮で照査を満足しなかった。

ウインド杓には、主塔位置中央径間側以外の1A及び4Aアンカレイジ位置、2P及び3Pの主塔位置側径間側で

表-3 照査を満足しない部位及び地震動

Table 3 Summary of seismic performance verification

部位	位置	照査を満足しない照査項目	照査を満足しない照査の方向 ^{※1}	照査を満足しない地震動
センターステイ	-	断面力照査 (張力照査)	LG	東南海・南海地震 芸予地震 伏在横ずれLG+UD 伏在逆LG+UD
主構トラス	桁端部付近	応力度照査, 安定照査	LG, TR	芸予地震
上下横構	桁端部付近	応力度照査	TR	芸予地震 伏在横ずれTR+UD 伏在逆TR+UD
横トラス	桁端部付近	応力度照査, 安定照査	LG, TR	東南海・南海地震 芸予地震 伏在横ずれTR+UD 伏在逆LG+UD 伏在逆TR+UD
ウインドタンク・ ウインド杓	側径間側	断面力照査	TR	芸予地震 伏在横ずれTR+UD 伏在逆TR+UD
	側径間側	移動量照査	LG	芸予地震
エンドリンク	アンカレイジ位置	断面力照査	LG	芸予地震
エンドストッパー	-	断面力照査	LG	東南海・南海地震 芸予地震 伏在逆LG+UD
道路桁支承	桁端、固定支承位置の 支承	断面力照査	LG, TR	全ての地震動
自歩道桁支承	桁端、主塔位置の支承	断面力照査	LG, TR	全ての地震動
桁の衝突 ^{※2}	アンカレイジ ～側径間桁	-	LG	芸予地震 伏在逆LG+UD
	主塔～側径間桁	-	LG	芸予地震
	主塔～中央径間桁	-	LG	芸予地震

※1 LG:橋軸方向, TR:橋軸直角方向, UD:鉛直方向

※2 桁の衝突照査については、7波それぞれについて実施

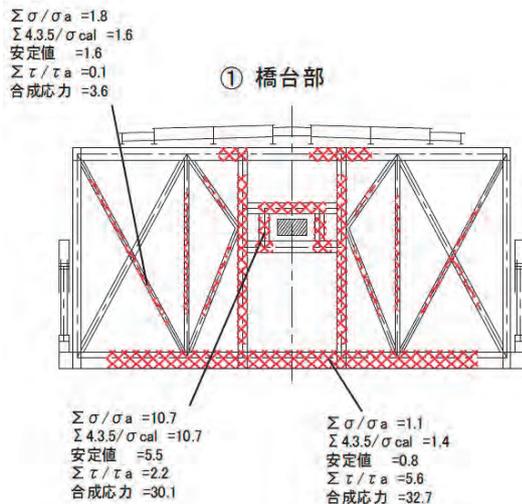


図-15 1A側端横トラスの照査結果
Fig. 15 Verification result for lateral truss at end

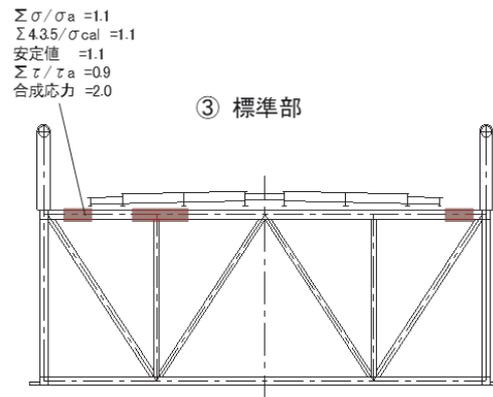


図-16 横トラス標準部の照査結果
Fig. 16 Verification result for lateral truss in standard section

水平力に対する照査を満足しなかった。

ウインドタングは、1A及び4Aアンカレイジ位置で水平力に対する照査を満足しないと同時に、1A及び4Aアンカレイジ位置、2P及び3Pの主塔位置側径間側で変位に対する照査を満足しなかった。

(4) その他

エンドストッパーは、1A及び4Aで橋軸方向の衝突後の水平力に対する照査を満足しなかった。

また、補剛トラス桁と主塔及びアンカレイジ間に、遊間以上の相対変位が生じることから衝突する結果となった。なお、衝突の照査については、7波それぞれについて実施した。

なお、センターステイは破断するが、破断を考慮した解析により、新たに損傷する部材がないことを確認している。

4.3 耐震補強検討で考慮すべき照査結果

耐震補強検討で考慮すべき照査結果は、以下のとおりである。

- (1) 側径間部の補剛トラス桁の橋軸方向変位量が大きく、エンドリンクや側径間部のウインドタングの移動量が照査を満足しない。
- (2) 補剛トラス桁の橋軸方向変位時に、端横トラス下弦材の突起部がエンドストッパーに衝突し、端横トラス及び主構に大きな損傷が生じる。
- (3) 側径間部において、複数の主構の上下弦材が応力度照査を満足しない。
- (4) 橋軸直角方向の地震力により、ウインド杓、ウインドタング及び周辺部の主横トラス部材が照査を満足しない。

5. おわりに

因島大橋の耐震性能照査の結果、芸予地震の影響により、側径間のアンカレイジ位置において、端横トラス下弦材とエンドストッパーが衝突することで、補剛トラス桁の主構及び横トラスで多くの損傷が生じることがわかった。

上述の耐震補強検討のポイントを踏まえた耐震補強検討及び耐震補強設計について、次号の本四技報で報告予定である。

海峡部長大橋の耐震補強設計については、来島海峡大橋のみが未了であり、現在検討中である。引き続き、これまで蓄積してきた知見を生かし合理的な耐震補強設計を行うと共に着実な耐震補強の進捗を図る予定である。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：耐震設計基準・同解説，1977
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012.3
- 3) 福永勸，遠藤和男：耐震補強検討に用いる大規模地震動の設定，本四技報，Vol.33，No.111，pp.18-23，2008.9
- 4) 下藪征史，園田圭巨，西本安氏志：ゴムの速度効果を考慮した防舷材の荷重-変位特性に関する解析的研究，応用力学論文集 Vol.10, pp.293-300, 2007.8
- 5) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説II鋼橋編，2012.3

本州四国連絡高速道路における暫定2車線区間への 中央分離帯ワイヤロープ式防護柵設置

Installation of wire rope-type protective fences in median strip for temporary two lane sections
on Honshu-Shikoku Expressway

村上 博基 Hiroki Murakami 吉丸 直明 Naoaki Yoshimaru 井上 晃祐 Kosuke Inoue

保全部 道路保全課長

保全部 道路保全課長代理

保全部 道路保全課

概要

本州四国連絡高速道路のうち、西瀬戸自動車道については暫定2車線区間を有しており、その区間における正面衝突事故の緊急対策として、ラバーポールに代えて中央分離帯ワイヤロープ式防護柵を土工区間等について設置している。

本稿では、中央分離帯ワイヤロープ式防護柵の設置及び設置方法について、設置の経緯、代替路の無い本州四国連絡高速道路の特性を踏まえた施工事例等を報告する。

Among the Honshu-Shikoku Expressway, the Nishi-Seto Expressway has a temporary two-lane section. In the earthwork sections in this two-lane section, median wire-rope barrier has been installed instead of rubber poles as an emergency measure against head-on collisions.

This paper reports the installation and its method of the wire-rope median barrier. And the story of the installation, and examples of construction based on the characteristics of the Honshu-Shikoku Expressway, which has no alternative roads.

1. はじめに

2019年9月、国土交通省より「高速道路における安全・安心基本計画」が策定された。高速道路の暫定2車線は国際的にも稀な構造であるとともに、速度低下や対面通行の安全性、大規模災害時の通行止めリスクといった課題があり、長期間存続させることは望ましくなくなり、全国で約1,600kmある有料区間における暫定2車線区間の4車線化が必要とされている。

この暫定2車線区間の4車線化を計画的に推進するため、優先的に事業化し整備する、課題の大きい区間「優先整備区間」が選定され、おおむね10～15年で有料区間の暫定2車線区間の半減を目指すことが示された。当社が管理する西瀬戸自動車道の暫定2車線区間のうち、約36kmもその対象となっており、現在4車線の事業化に向け、調査設計等を進めているところである。

高速道路の4車線化の事業完了には、一般的に5～7年（橋梁やトンネル等の構造物の整備を要する場合は10年程度）を要することから、暫定2車線区間における当面の緊急対策として、ラバーポールに代えて中央分離帯ワイヤロープ式防護柵（以下「中分ワイヤロープ」という。）を設置することとなった。

以上の経緯を踏まえ、2020年3月、当社の「高速道路

における安全・安心実施計画」を策定し、土工区間について中分ワイヤロープの設置を進めることとした。2020年9月より順次着手し、2021年9月、今回設置対象区間とした約19kmへの中分ワイヤロープの設置が完了した。

西瀬戸自動車道は、島しょ部に住む人々にとっての生活道路として利用されている。通常、中分ワイヤロープの設置は、通行止めの状態で施工される。しかしながら、代替路の無い海峡部区間を通行止めにより施工すると、ご利用されるお客様はもとより、地域に与える影響が大きいことから、極力通行止めを回避するため、片側交互通行規制による施工を検討した。検討にあたっては、供用中の道路かつ、限られた空間での施工となるため、お客様の安全性を確保した施工計画の立案が必要であった。

本稿は、その前例の無い「片側交互通行規制による中分ワイヤロープの設置」における施工時の工夫点等を報告するものである。

2. 西瀬戸自動車道の概要

西瀬戸自動車道は、広島県（西瀬戸尾道IC）から愛媛県（今治IC）に至る全長59.4km（うち、当社管理区間46.6km）の自動車専用道路で2006年4月に全線開通した。

「しまなみ海道」の愛称で親しまれ、7つの島を結ぶ全9橋の長大橋群を有し、かつ自転車歩行者道及びバイ

ク道(125cc以下)が併設されており、島しょ部に住む人々にとっての生活道路として利用されている。また、ナショナルサイクルルートに指定されるなど、「サイクリストの聖地」として、世界的にも注目されている。

今回の中分ワイヤロープ設置対象区間は、優先整備区間に選定された約36kmの暫定2車線区間のうち、土工区間(L=300m以上)及び中小橋梁(L=50m未満)の合計約19kmである(図-1)。



図-1 西瀬戸自動車道の車線概要
Fig.1 Overview of lanes on the Nishi-Seto Expressway

3. 中分ワイヤロープ設置方針

3.1 一般的な施工方法

2020年3月に一部改訂された「ワイヤロープ式防護柵整備ガイドライン(案)」²⁾によると、中分ワイヤロープ施工にあたっては「供用後や現道への設置は杭打ち機の施工範囲が通行止めにつながるため留意が必要」とされ、その施工計画は通行止めを基本としている。

3.2 本四高速における施工方法

代替路の無い海峡部区間は、片側交互通行規制により施工するため、お客様の安全性を確保した施工計画の立案が必要である。交通管理者(以下「高速隊」という。)との工事実施に伴う道路使用協議(以下「協議」という。)を重ねた結果、以下2点の課題をクリアする必要があった。

(1) 必要な通行車線幅(3.1m)の確保

規制時の通行車線幅は、規制速度を50km/hに制限すること及び設計車両幅(2.5m)を踏まえ、路肩部分を含めた3.1mとすることで高速隊との協議を実施した(図-2)。また、中分ワイヤロープ支柱を据えるための掘削作業中は、掘削岩石及び粉塵に対して、飛散防止ネットを設置するため、規制境界を明示するラバーコーン幅(0.4m)を含む1.8mの作業ヤード幅が必要となり、従来より維持作業等に汎用していた飛散防止ネットを規制境界付近に設置すると、走行車両へ圧迫感を与えてしまうことから、掘削機自体に飛散防止対策を講じることで、飛散防止ネットの小型化を図ることとした。

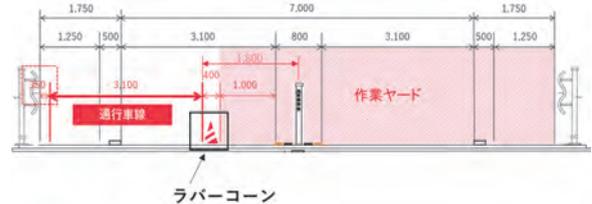


図-2 片側交互通行規制時の標準施工断面

Fig.2 Standard construction cross-section when two-lane road is restricted to one-way alternating traffic

1) 掘削機自体の噴き上げ防止対策

掘削機は、ハンマーピストンが圧縮された空気供給により往復運動を起こすことで、先端に取り付けられたビットを打撃し、岩盤を細かく破碎しながら掘削する仕組みとなっている。その際、破碎された掘削岩石及び粉塵は、ハンマーピストンを駆動した空気により地上部へ噴き上がるため、走行車両に対する掘削岩石及び粉塵の飛散防止対策として以下を講じた(写真-1)。

- ・対策1: 噴き上げ防止カバーの設置

ハンマーピストン沿いに噴き上がる掘削岩石及び粉塵への飛散防止として、ドリル周囲に工事用送風機のダクトホースを利用した。

- ・対策2: 防護カバーの設置

掘削箇所の周囲を完全に覆う形でポリエチレンカバーを設置した。



写真-1 掘削機自体の噴き上げ防止対策

Photo 1 Measures to prevent dust scattering from excavator

2) 飛散防止ネットの小型化

上記(1)の対策により、飛散リスクが減少したことから、飛散防止ネットの小型化が可能となり(写真-2(改良前)、写真-3(改良後))、走行車両への圧迫感の軽減のほか、飛散防止ネットの転倒リスクの軽減や移動も容易となり、作業員の視野確保の向上につながった。

以上1)、2)の対策により、通行車線幅(3.1m)の確保が可能となった。



飛散防止ネット寸法：H=1.5m, L=4.0m, W=1.8m

写真-2 飛散防止ネットの小型化(改良前)

Photo 2 Shatterproof net before miniaturization



飛散防止ネット寸法：H=1.0m, L=3.4m, W=0.5m

写真-3 飛散防止ネットの小型化(改良後)

Photo 3 Miniaturized of shatterproof net

(2) 路肩部分を含む通行車線における片側交互交通規制の安全対策

(1)により必要な走行車線幅(3.1m)を確保したが、路肩を含むことから、片側交互交通規制時には、一旦停止した車列の先頭に常に先導車(ペースカー)を配置し(写真-4)、速度抑制(50km/h)を実施した。



写真-4 先導車の走行状況

Photo 4 The running of the lead vehicle

また、先導車が可能な範囲で「路肩寄り」に走行することで、後続の車列(お客様車両)が規制境界に近づくことを抑制することができた。これにより、作業員自身の安全性が向上し、事故なく施工を完了することができた。

4. 整備効果

4.1 全国の設定後事故状況

2021年6月8日開催の第5回 高速道路の正面衝突事故防止対策に関する技術検討委員会資料(表-1、表-2)³⁾によると、2020年12月31日までの中分ワイヤロープ接触事案1,323件のうち、対向車線飛出し事故は5件のみであり、高い飛出し防止効果を発揮している。この5件の飛出し事故は、いずれも大型車によるものの死傷者ならびに対向車両への接触は無かった。また、飛出しの要因としては、中分ワイヤロープへの衝突エネルギーが実験時(想定)の約1.5倍~3倍であったために、捕捉しきれなかったと推測されている。

表-1 中分ワイヤロープ設置区間における対向車線への飛出し事故件数

Table 1 Number of flying into oncoming traffic accidents in wire-rope median barrier installation section (In NEXCO areas)

	R2(2020) 年度 (R2.12まで)	R1/H31 (2019) 年度	H30 (2018) 年度	H29 (2017) 年度	(参考) H28(2016) 飛出し事故
対向車線 飛出し事故	0件	1件	3件	1件	157件
うち 死亡事故	0件	0件	0件	0件	9件
うち 負傷事故	0件	0件	0件	0件	28件

※NEXCO3社が管理する道路における件数を集計

※「H28(2016)飛出し事故」は、

R2.12までにワイヤロープを設置したIC間におけるH28年1年間の飛出し件数

表-2 中分ワイヤロープ設置区間における接触事案数

Table 2 Number of contact cases in wire-rope median barrier installation section(In NEXCO areas)

	小型車	大型車	車種不明 (原因車不明)	合計
接触事案数	954件	129件	240件	1,323件
対向車線 飛出し事故	0件	5件	0件	5件

※NEXCO3社が管理する道路における件数を集計

※データ期間：ワイヤロープ設置から2020/12/31まで

4.2 本四高速の設置後事故状況

4.1と同様に本四高速管内については、中分ワイヤロープ設置前5年間の対向車線飛出し事故件数は6件、うち2件が死亡事故だったが(表-3)、設置後は、2021年12月時点で接触事案数が8件、うち対向車線飛出し事故が0件であることから(表-4)、中分ワイヤロープが対向車線への飛出し防止効果を発揮していることがうかがえる。

表-3 中分ワイヤロープ設置区間における対向車線への飛出し事故件数(本四高速管内)

Table 3 Number of flying into oncoming traffic accidents in wire-rope median barrier installation section (In Honshu-Shikoku Expressway areas)

	R3(2021) 年度 (R3.12まで)	R2 (2020) 年度	R1/H31 (2019) 年度	H30 (2018) 年度	H29 (2017) 年度	H28 (2016) 年度
対向車線 飛出し事故	0件	0件	3件	1件	1件	1件
うち 死亡事故	0件	0件	0件	0件	1件	1件
うち 負傷事故	0件	0件	1件	0件	0件	0件

※本四高速が管理する道路における件数を集計

表-4 中分ワイヤロープ設置区間における接触事案数(本四高速管内)

Table 4 Number of contact cases in wire-rope median barrier installation section (in Honshu-Shikoku Expressway areas)

	小型車	大型車	車種不明 (原因車不明)	合計
接触事案数	8件	0件	0件	8件
対向車線 飛出し事故	0件	0件	0件	0件

※本四高速が管理する道路における件数を集計

※データ期間：ワイヤロープ設置から2021/12/31まで

5. 今後の課題と展望

5.1 規制時間の短縮に向けた取組

中分ワイヤロープ設置前に発生した飛出し事故6件(表-3)、また、中分ワイヤロープ設置後に発生した接触事故8件(表-4)について、事故対応に要した時間と併せ、以下の補修実施区分により整理した(表-5、表-6)。

補修実施区分(A)：中分ワイヤロープが事故の損傷により機能低下しており、通行止めによる速やかな補修が必要な場合

補修実施区分(B)：補修実施区分(A)以外の場合

(1) 中分ワイヤロープ設置後の事故対応に要する時間

事故対応に要する時間について、中分ワイヤロープの設置前後を比較した。中分ワイヤロープ設置前については、表-5より、事故対応に要した時間が平均3時間12分、うち通行止め時間が平均2時間18分であったのに対し、ワイヤロープ設置後は、表-6より、事故対応に要した時間が平均2時間37分、うち通行止め時間が平均2時間24分であった。したがって、事故対応に要する時間は中分ワイヤロープを設置した後も設置前と同程度であることがうかがえる。

表-5 中分ワイヤロープ設置以前の飛出し事故に対する補修実施区分と事故対応に要した時間

Table 5 Repair implementation categories and time taken to respond to accidents involving fly-outs prior to the installation of a wire-rope median barrier

	発生日	発生区間	通行止め 有・無	事故対応に要した時間 (h : m)	
					うち、 通行止め時間
1	2016/5/23	大三島～伯方島	有	5:32	0:17
2	2017/6/17	大三島～伯方島	有	4:53	3:55
3	2019/3/27	因島北～因島南	無	1:49	—
4	2019/5/28	大三島～伯方島	有	3:14	2:43
5	2019/6/23	因島北～因島南	無	1:20	—
6	2020/1/7	大三島～伯方島	無	2:24	—
平均				3:12	2:18

※本四高速が管理する道路における件数を集計

※2021.12までにワイヤロープを設置したIC間における飛出し件数

表-6 中分ワイヤロープ設置後の接触事故に対する補修実施区分と事故対応に要した時間

Table 6 Repair implementation categories and time taken to respond to accidents involving fly-outs after the installation of a wire-rope median barrier

	発生日	発生区間	補修 実施 区分	通行止め 有・無	事故対応に要した時間 (h : m)	
						うち、 通行止め時間
1	2021/1/6	因島北～因島南	(B)	無	1:16	—
2	2021/4/6	西瀬戸尾道～向島	(B)	無	2:04	—
3	2021/5/10	向島～因島北	(B)	無	1:32	—
4	2021/10/7	因島北～因島南	(B)	無	1:25	—
5	2021/10/16	今治北～今治	(A)	有	3:09	2:49
6	2021/10/18	向島～因島北	(A)	有	2:25	0:30
7	2021/11/19	因島北～因島南	(A)	有	7:05	5:25
8	2022/2/13	因島北～因島南	(A)	有	2:01	0:55
平均					2:37	2:24

※本四高速が管理する道路における件数を集計

※2021.12までにワイヤロープを設置したIC間における中分ワイヤロープ接触事案件数

(2) 中分ワイヤロープ設置後の補修実施区分

事故後の補修実施区分について、中分ワイヤロープ設置前は、事故発生後、壊れたラバーボールを片付け交通開放した後、後日改めて復旧する形を取っていたが、中分ワイヤロープ設置後は、接触事故8件のうち、半数の4件が補修実施区分(A)となり、交通開放するためには、通行止めを実施し、速やかな補修を必要とした。最大5時間以上の通行止めを要したケースも存在している(写真-5)。



写真-5 5時間以上もの通行止めを要した事故の状況

Photo 5 Accident that caused road closure for more than five hours

本四高速では、補修実施区分(A)に相当する中分ワイヤロープ損傷事故が発生した場合に、可能な限り短時間で交通開放するため、以下の対応を実施しているところである。

- ・グループ会社社員が365日24時間、緊急連絡体制を構築し、復旧作業員として、5～10名体制(協力会社含む)を構築する計画を策定
- ・復旧用資材(各200m分)をしまなみ尾道管理センター、しまなみ今治管理センターにそれぞれ備蓄
- ・訓練用中分ワイヤロープを使った復旧作業習熟訓練を定期的実施(写真-6)



写真-6 中分ワイヤロープ復旧作業習熟訓練状況
Photo 6 Wire-rope median barrier restoration training.

5.2 接触防止(視認性の向上)への取組の推進

5.1に示す事故後の早期復旧に向けた取組を推進する一方で、「高速道路の正面衝突事故防止対策に関する技術検討委員会」において視認性向上に関する取組として紹介された「ラップ部青色反射テープ(写真-7)」や接触率低減を目的とした「凹凸型路面標示(写真-8)」等を一部に採用し、接触防止に向けた取組を実施しているところである。



写真-7 ラップ部青色反射テープ
Photo 7 Blue reflective tape for wrap



写真-8 凹凸型路面標示
Photo 8 Uneven road markings

6. まとめ

西瀬戸自動車道の暫定2車線区間(約36km)のうち、土工区間(L=300m以上)及び中小橋梁(L=50m未満)の合計約19kmについて、4車線化までの正面衝突事故に対する緊急対策として、中分ワイヤロープを設置した。

西瀬戸自動車道は、島しょ部に住む人々にとっての生活道路として利用されており、その施工にあたっては、代替路の無い海峡部区間の通行止めは、ご利用されるお客様はもとより、地域に与える影響が大きいことから、極力通行止めを回避するため、片側交互通行規制により実施する計画とした。施工計画の立案にあたっては、供用中の道路かつ、限られた空間での施工となるため、お客様の安全性の確保が課題であったが、先述のとおり施工時に工夫を凝らすことで、無事故で施工を終えることができた。また、ワイヤロープ設置後の事故状況より、重大事故の抑制に効果がみられる。

7. おわりに

このたび、代替路の無い海峡部区間を通行止めすることなく、片側交互通行規制により無事故で中分ワイヤロープを設置したことは、「現場特有の状況に対応するための創意工夫」として、独立行政法人 日本高速道路保有・債務返済機構より評価を頂戴した。

今後は、維持管理上の課題である事故発生時の早期復旧や視認性向上への取組の推進により、より一層の事故防止に努めてまいりたい。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局：高速道路における安全・安心基本計画，2019
- 2) 国立研究開発法人 土木研究所，寒地土木研究所：ワイヤロープ式防護柵 整備ガイドライン(案)，2020.3
- 3) 国土交通省 道路局：第5回 高速道路の正面衝突事故防止対策に関する技術検討委員会 配布資料

ゆめしま海道「岩城橋」の工事報告

Construction Report of Iwagi Bridge, Yumeshima Kaido

木村 一也 Kazuya Kimura

しまなみ今治管理センター 計画グループエキスパート
前) 長大橋・技術部
総括・耐震・耐風グループエキスパート

概要

ゆめしま海道の「岩城橋」が、令和4年3月に開通した。岩城島と生名島との間の「長江瀬戸」を渡る中央径間475mの混合斜張橋である。重厚なRC主塔から斜材で張られた混合桁は、同系色で幅員が狭いため、ひと際スレンダーに見える。筆者は、本橋の建設から供用までの約5年間、同橋の工事監理支援業務の担当技術者として建設工事に携わらせていただいた。本稿はその工事概要について報告するものである。

Iwagi Bridge in Yumeshima Kaido was completed on March, 4, 2022. The bridge, a composite cable-stayed bridge with a central span length of 475m, crosses a strait named Nagae-Seto between Iwagi and Ikina Islands. The girder strung with diagonal cables from the massive reinforced concrete tower looks slender because of their similar colors and narrow deck width. The author supervised the construction of the bridge under technical cooperation project of the construction work for about five years. The report shows the outline of the construction record of the bridge.

1. はじめに

岩城橋は、愛媛県越智郡上島町の岩城島と生名島を結ぶ橋長735mの5径間連続鋼・コンクリート混合斜張橋である。令和4年3月20日の開通により、上島町の4島が3橋の斜張橋で結ばれ、ゆめしま海道全線(L=6.1km)が陸続きとなった(図-1、写真-1)。

筆者は、平成29年7月の起工式から工事竣工を迎えた令和4年2月までの約5年間、愛媛県今治土木事務所に滞在して、工事監理支援業務に携わらせていただいた。既に本橋の設計¹⁾、施工²⁾内容に関しては、各専門の方々により詳細な報告がなされている。本橋は後述のとおり、中央径間中央をはさんで、岩城島側と生名島側との2工区に分けて工事が行われた。同種の目的物を施工する場合においても、それぞれの工区によって施工方法等が異なるケースがあり、両工区に跨る施工管理の観点から、品質管理や施工法の違いにも焦点を当てて、工事関係資料、施工状況写真等を基に本稿を作成した。

なお、本橋は、完成後、両島側の取付橋の長さを含む全長916mの区間が正式な橋長とされたが、本稿では、建設当時の橋長、橋名等でご報告をさせていただくことをご了承願いたい。

2. 橋梁概要

橋梁の諸元、構造形式を以下に示す。図-2に全体一般図、図-3に主桁と主塔の各断面図を示す。

橋梁形式 5径間連続鋼・コンクリート混合斜張橋

橋長	735m (55m+75m+475m+75m+55m)
有効幅員	7.5m (路肩1m×2, 車道2.75m×2車線)
縦断勾配	+5.0%~-5.0%
主塔形式	RC構造 (直接基礎)
主桁形式	PC桁: 張出式2室1箱桁 (RC床版) 鋼桁: 1室1箱桁 (鋼床版) 接合部: 中詰めコンクリート後面板方式
斜材	主塔側: セパレート方式 (PC鋼材補強) PC桁側: 支圧 (横桁) 定着方式 鋼桁側: 角柱アンカー方式 制振方法: 桁側定着部「高減衰ゴムダンパー」 : 被覆管表面「Uストラップに改良」
支承形式	免震 (LRB) 支承 (1Pは弾性支承)
伸縮装置	モジュラー形式

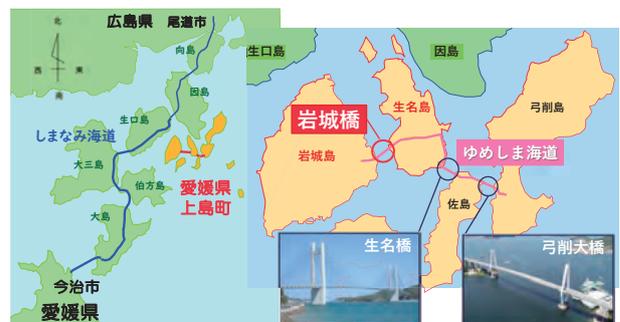


図-1 ゆめしま海道と岩城橋位置図

Fig. 1 Location of Yumeshima Kaido and Iwagi Bridge

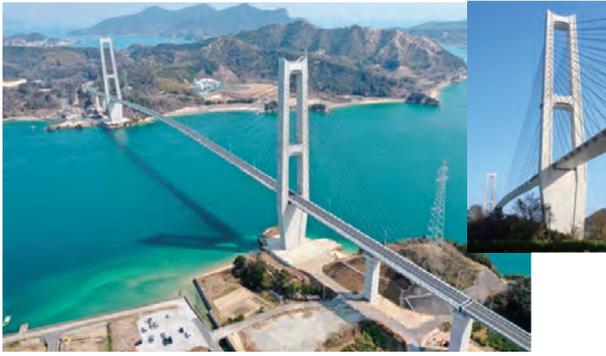


写真-1 岩城橋の竣工写真（岩城島側から）
Photo 1 Iwagi Bridge from Iwagi Island

本橋の橋梁計画上的特徴を以下に示す。

また、維持管理スペースを確保するため、主塔内の斜材定着部はセパレート方式を採用し、桁高もH=2.5mとし、内空断面を広く確保している。

2.1 桁下高

桁下高は、近隣の造船所で建造される大型船舶の通過から45.5mと決定され、周辺の生口橋（26m）や多々羅大橋（40m）に比べると高く設定されている。また、両取付高架橋まで縦断勾配は5%と急である。

2.2 主塔位置

上島架橋のうち、先に建設された弓削大橋及び生名橋は海上部に橋脚を有する。岩城橋は、両島岬の岩盤上に主塔基礎を構築することで、規模は大きくなるものの、施工時から海上部での仮設構造物を必要とせず、また、今後の維持管理においても有利な立地条件となる。

2.3 接合部の位置

中央径間側に1/8程度（62m）張り出した位置としている。側径間支承部にも負反力は発生せず、主塔からのバランスング架設で水深の浅い沿岸部を通過し、鋼桁架設に必要な喫水深H=5.0mが確保できる海上地点である。

2.4 基礎の形式

主塔は直接基礎、側径間部の基礎は、柱状体深礎基礎（φ9.5m）である。但し支持層が深いIP橋脚基礎は場所打ち杭（φ2.0m）を採用し、他の橋脚位置で使用されている免震沓ではなく積層ゴムによる分散沓としている。

表-1 施工部位と使用材料
Table 1 Materials Used for Construction

施工部位	コンクリート		鉄筋、鋼材
	σ _{ck}	セメント	
底板	24N/mm ²	高炉B	SD345
橋脚	30N/mm ²	普通、膨張材	SD490(主筋)SD345(帯筋)
主塔	40N/mm ²	普通、膨張材	SD490(主筋)SD345(帯筋)、 プレグラウトPC鋼棒φ32mm
PC桁	40N/mm ²	早強、膨張材	SD345 PC鋼棒φ32mm、 PC: 12s15.2, 12s12.7, 1s28.6
鋼桁			SM490, SS400
斜材			FUT-H(現場収束型)19、24、31H

* 鉄筋は、底板とPC桁内空の一部以外はエポキシ樹脂塗装

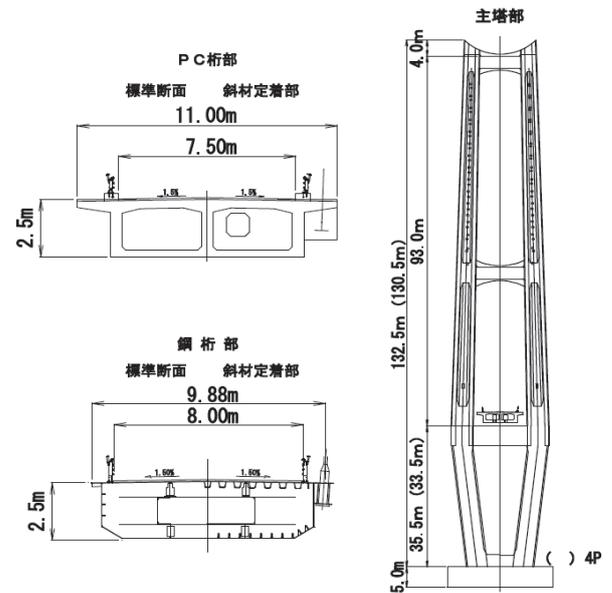


図-3 主桁断面図・主塔断面図
Fig. 3 Sections for Girder and Tower

表-1に、各構造物の施工部位での使用材料を示す。

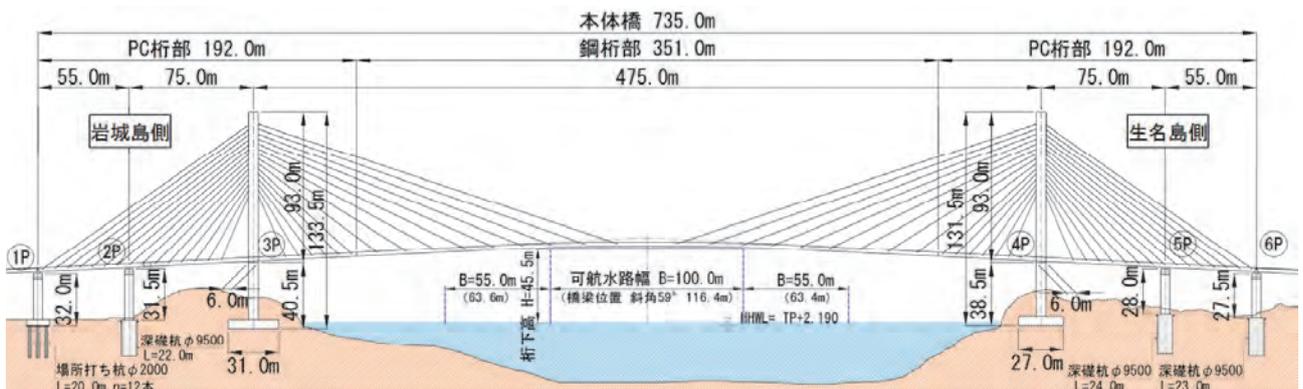


図-2 全体一般図
Fig. 2 General View of the Bridge

3. 工事の概要

本橋の工事は、中央径間中央を境に2工区に分けて施工が行われた。本報では、起点となる岩城島側をその1工区（又は3P側）、終点の生名島側をその2工区（又は4P側）と呼ぶ。なお、側径間の下部工は、別途近隣事業者による施工である。

図-4に岩城橋の施工ステップ4段階のうち、代表的な「STEP2（PC桁の張出架設と固定支保工施工）」と「STEP3（鋼桁の順次架設）」を示す。なお、「STEP1」は主塔及び側径間橋脚の単独施工、最後の「STEP4」は鋼桁閉合後の橋面工施工であり、完成となる。

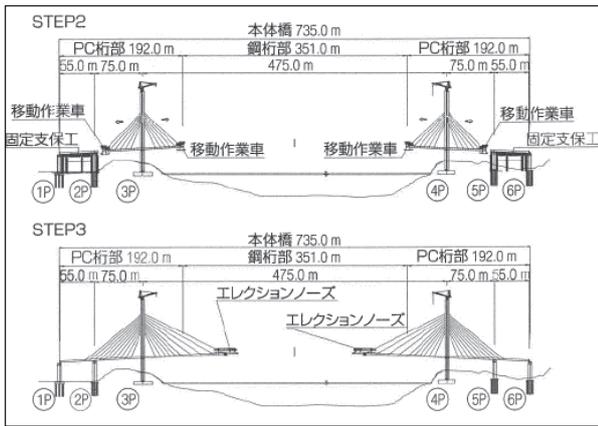


図-4 代表的な施工フロー
Fig. 4 Construction Procedure

図-5に本橋の概略工程を示す。主塔部の本格的な施工は、平成29年7月の起工式からであり、完成までには3年以上を要し、当該工事の主たる部分を占めている。

年度	1P	2P	3P	4P	5P	6P
H28	土工	土工		土工		
H29		深礎杭	掘削工	掘削工		深礎杭
H30	場所打杭	橋脚	フーチング	橋脚	深礎杭	橋脚
H31 (R1)			主塔	主塔	橋脚	
R2		PC桁	PC桁	PC桁		PC桁
			鋼桁	鋼桁		
R3	張力調整・地覆高欄工・舗装・設備工					

図-5 岩城橋建設の概略工程
Fig. 5 Construction Schedule for the Bridge

4. 主塔の施工

4.1 主塔基礎

(1) 支持地盤

岩城島（3P）側、生名島（4P）側共に風化花崗岩で、支持層はCL級岩盤としている。このため、底板下面は、3PでTP-1.4m、4PではTP+0.6mの位置となり、3P橋脚が4P橋脚に比べ2m高くなっている（図-2）。

施工は、ブレーカやショベル系による機械掘削で、3P側は地形が狭小のため、海岸部近傍では自立式鋼矢板（硬質地盤クリア工法）を採用した。掘削が進み支持層面まで到達した段階で、一部粘土化した弱部（熱水変質脈）が出現した。規模も小さくすべり面を形成するものではないとの判断のもと、コンクリートに置き換えられた（写真-2）。

一方、4P側においても、DH層の露出状態となった。本四連絡橋の建設時の実績等に基づくシュミットハンマー値や、平板載荷試験を行い十分な支持力があることを確認し、施工を進めた（写真-3）。



写真-2 3P側 置き換えコンクリートの施工
Photo 2 Replacing Ground Soil with Concrete



写真-3 4P側 掘削面と平板載荷試験の状況
Photo 3 Plate Loading Test, 4P Side

(2) 底板の配筋

底板の形状は、3P側で25.0m×30.5m×5m、4P側で27.0m×27.0m×5mと底板面積が大きい。従って、資材の搬入には、タワークレーンなど主クレーンの他、ヤード条件に適う補助クレーンが使用された。

配筋方法は、3P側では作業性から、「主筋は機械式継手、鉛直スターラップは1本とし下面側を機械式定着」に変更している。従って、底版配筋を完成状態とした後、コンクリートを打設している(写真-4, 6)。4P側は設計どおり、「主筋(D51)はガス圧接継手、鉛直スターラップは2本の半円形フックによる重ね継手」の施工(写真-5, 7)としている。



写真-4 変更した機械式継手の施工 (3P 側)
Photo 4 Mechanical Joints, 3P Side



写真-5 D51 ガス圧接継手の施工と出来形 (4P 側)
Photo 5 Gas Welding Joints, 4P Side

(3) 底版のコンクリート打設

本橋では、コンクリート部材に関して、温度応力解析を行い、各部位とも鉄筋応力度による制御を基本としたひび割れ抑制対策を講じている。

ただし、埋め戻しにより、目視確認が不可能となる底板や、海水面に近く塩分が飛来する橋脚部(中空内除く)は、ひび割れ指数(ひび割れの発生確率)による制御も併せて行い品質確保を目指した。特に底板では、主塔から大きな鉛直力を支持する構造であり、塔橋脚直下(フーチング中心部)の応力状態にも着目して、ひび割れ指数が1.0以上となるよう両工区共にリフト割(当初は1m×5リフト)を少量・多層とする薄層打設に変更した。

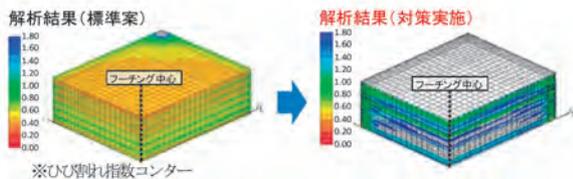


図-6 3P 底板中心部の温度応力解析例
Fig. 6 Result of Thermal Stress Analysis, 3P Bottom Slab

図-6に3P側で、標準案(ここでは島内プラントの供給能力から6リフトで設定)から対策実施(10リフトの

薄層連続打設)に変更することで、ひび割れ指数1.0以上を確保した温度解析結果を示す。打設量を少なくしてリフト高さを抑えることで、水和熱によるコンクリート内の温度上昇を抑えると共に、打設間隔を2~3日と短くすることで、新旧リフト間の温度差も低減する打設方法である。写真-8に1リフト目コンクリートの打設状況を示す。配筋や型枠を全て構築した後、コンクリートの打設が行われた。なお、最上段リフトのみ膨張材を添加し、側面にはひび割れ幅抑制のため、補強鉄筋を追加している。埋め戻し迄(4週間)の間、躯体のひび割れは認められなかった。一方の4P側も8リフトに分割した。施工時期が冬期であったことから、一時の間シート内に練炭設備を準備する等、寒中コンクリート対策が行われた。写真-9に4P側の最終8リフト目のコンクリート打設と天端の均し作業状況を示す。

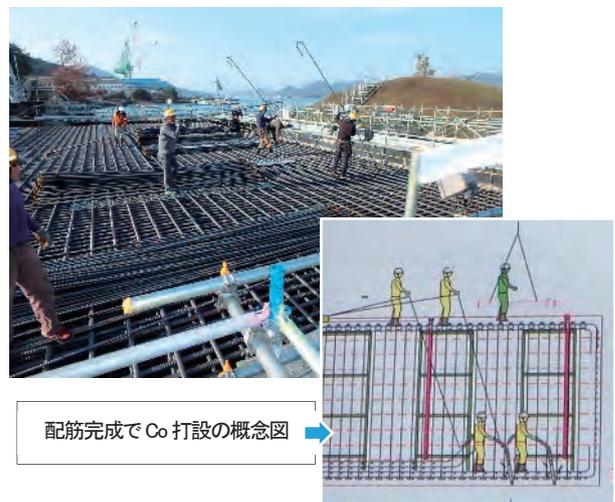


写真-6 完成形でのスターラップ挿入 (3P 側)
Photo 6 Arrangement for Stirrups, 3P Side

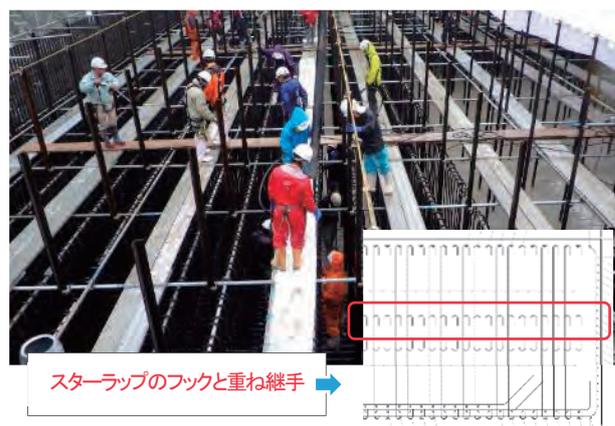


写真-7 中段までの配筋でCoを打設 (4P 側)
Photo 7 Concrete Casting, 4P Side

(4) 埋め戻し

埋め戻しは、長期的な浸食・風化の防止と、底板内鋼材の防錆も兼ね、貧配合のコンクリート($\sigma_{ck}=18N/mm^2$)により実施した。



写真-8 1リフト目のCo打設 (3P側)
Photo 8 Concrete Casting for the First Lift, 3P Side



写真-9 最終8リフト目のCo打設 (4P側)
Photo 9 Concret Casting for the Final Eighth Lift, 4P Side

4.2 橋脚部の施工

橋脚部は、充実部と中空部合わせ数量約 3,000m³ を 12 リフトで施工した (図-7)。温度ひび割れ対策として、セメントの種別を高炉 B から普通ポルトランドセメントに変更し、初期のひび割れ抵抗性を向上させると共に、膨張材の添加や表面に発生する引張応力に対しては補強鉄筋を追加した。図-8 に 4P 側での温度解析結果を示す。第 1, 9 及び 12 リフト目のコンクリート打設時に、膨張材を添加することで、図中右に示す外面の「ひび割れ指数 1.0 以上」を確保した。図中左には、内部の最大温度分布を示すが、部位により 80℃ 近くとなっている。

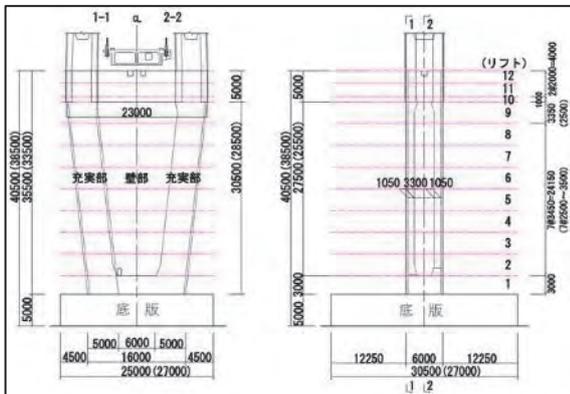


図-7 橋脚部の形状とリフト割
Fig. 7 Lift-dividing for the Pier

上部リフトは 80℃ に上昇 全リフトひび割れ指数 1.0 以上

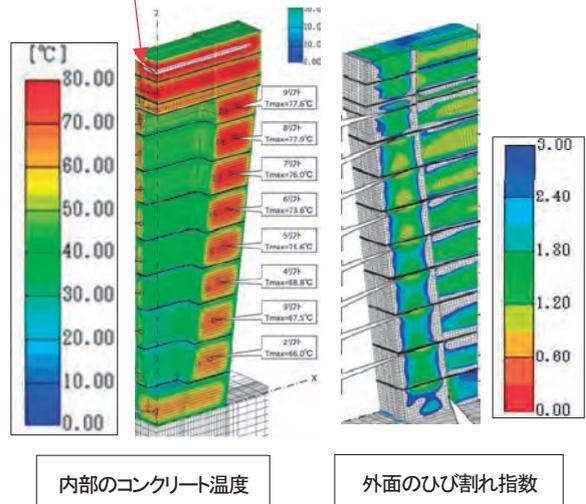


図-8 橋脚部の温度応力解析 (4P 橋脚)

Fig. 8 Result of Thermal Stress Analysis for the Pier, 4P

一方、暑中期間の施工となる 3P 側の第 1 及び 2 リフトでは、パイプクーリングによるピンポイント冷却を行い、温度ひび割れ対策を実施した (写真-10)。

両工区共に、一部壁面にひび割れは発生したものの、要補修の管理規定値 0.2mm を下回る 0.1mm 前後のひび割れ幅であった。



写真-10 エアerpイプクーリング (3P 側)
Photo 10 Pipe Cooling, 3P Side

橋脚の配筋作業では、橋軸直角方向の形状が基部で 16m、橋頭部で 23m と逆台形であり、太径 (D51) で長尺の主筋を配置するため、両工区共に傾斜角度を保持するフレーム等が用いられた (写真-11)。

また、地上で帯鉄筋や中間帯鉄筋を地組みしたものをタワークレーンで吊り上げ架設することで、施工の効率化や安全性の向上を図った (写真-12)。特に 3P 側では、地組み段階で中間帯鉄筋の重ね継手部を一本化したり、機械式継手に変更し作業を省力化した (写真-13)。

4.3 主塔の施工

(1) 試験施工

主塔の斜材定着構造は、図-9, 10 に示すとおり、セパレート方式 (PC 鋼材補強) である。実績も少ないため

事前に実物の 1/2 サイズのモデルを作成して、施工性の確認や耐荷性能の検証を行った。



写真-11 傾斜角度保持フレームの例 (3P 側)
Photo 11 Example of Inclination Angle Holding Frame, 3P Side



写真-12 ノップキャリア工法 (3P 側)
Photo 12 Installation of Rebars, 3P Side

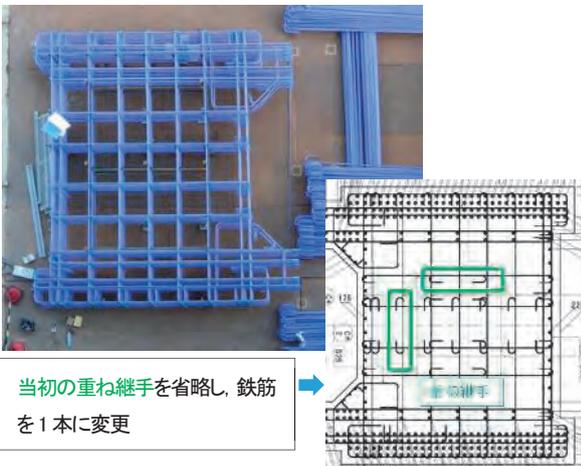


写真-13 帯鉄筋の地組状況 (上空から) (3P 側)
Photo 13 Fabrication of Tie Bars, 3P Side

施工性としては、配筋手順や鋼材間のあき寸法、コンクリートの充填性等を確認した(写真-14)。

耐荷性能としては、設計荷重 (0.4Pu) 相当の荷重ではひび割れが発生しないこと、試験設備でのジャッキ能力最大荷重 (2.7Pu) 時でも、押し抜きせん断破壊等の破壊現象には至らず、十分な安全性を有していることを検証した(写真-15)。

固定方式 名称	クロス定着	分離固定方式 セパレート定着	連結定着	貫通固定方式 サドル定着
概念図				

図-9 主塔部の定着構造の選定
Fig. 9 Selection of Anchor Structures for Tower

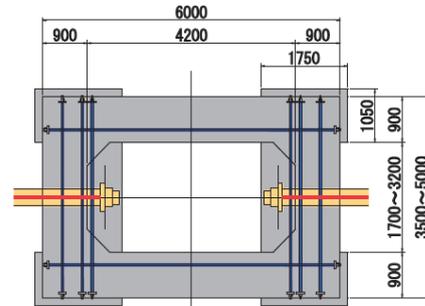


図-10 定着部の概念図 (φ32 プレグラウト鋼棒)
Fig. 10 Structure for Anchor Part



写真-14 1/2 モデルでの施工性試験
Photo 14 Constructability Test with 1/2 Model

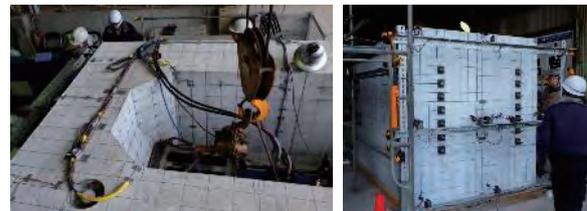


写真-15 1/2 モデルでの荷重載荷試験
Photo 15 Loading Test with 1/2 Model

(2) 斜材定着部の施工手順

主塔の施工手順は、定着部を例として、1)鉄骨と定着管の製作・一体化、2)吊り上げ、3)鉄骨据え付け、4)鋼材・配筋、5)PC定着型枠、6)躯体型枠、7)コンクリート打設・脱型、8)PC鋼棒緊張、を繰り返す。このうち代表的な施工段階における施工状況を写真-16に示す。

標準サイクルは、1リフト1塔柱を約2週間で施工し、左右の塔柱を1週間毎、交互にコンクリートを打設した。

(3) 鉄骨の組み立て

斜材定着管は、製作工場で鉄骨架台と定着管を取付けたものを現地に輸送し、タワークレーンで吊上げ設置し

た。据付け前に出来形を計測すると共に、塔内への設置後もGPS測量等で立体的な位置を確認しながら行った(写真-17)。



写真-16 主塔定着部の施工手順 (4P側)
Photo 16 Construction Procedure of Anchr Part in Tower

主塔への据付け初期の頃、3P側で定着管取付け部の鉄骨の剛性不足、据付け誤差等と推定される理由により、斜材設置後にストランドに固定する緩衝ゴムと、定着管との離隔距離(設計上の離隔:5mm以上)が不足する事象が生じた。鉄骨と定着管の連結を強化(梁を追加)し、定着構造の剛性を増したり、施工時のマーキング付けや定着管の傾きを設置前後で確認する等、より施工精度の向上を図ったことで、それ以降は支障なく設置することができた。なお、離隔距離が不足した2か所は、流し込みタイプのゴムを使用することにより、緩衝及び止水性能の確保を行うこととした。



写真-17 斜材定着管の製作と据え付け (3P側)
Photo 17 Fabrication and Installation of Anchor Duct for Cable

(4) コンクリート打設

斜材定着部のピッチ割から、1リフトは3m程度となる。コンクリートは、高性能 AE 減水剤を使用することを前提に、温度応力解析を行い、全てのリフトで膨張材を添加した。なお、スランプ値は、4Pでは15cm、3Pでは15~18cmで管理を行った。打ち込み方法は、斜材定着部より下部はポンプ打設を基本とし、それより塔頂までの上部について、4P側では定置(配管)式の超高压ポンプ車(写真-18)により打設し、3P側では技術提案の履行として、特殊バケット(コンクルット)を用いてタワークレーンにより打設した(写真-19)。



写真-18 超高压定置式ポンプ車 (4P側)
Photo 18 Ultra High-pressure Pump Truck, 4P Side



写真-19 特殊バケットでのCo打設 (3P側)
Photo 19 Concrete Casting by Special Bucket, 3P Side

打設にあたっては、躯体断面内は相当密な配筋状態(主筋のみで約300本以上)の中、ホース先端を挿入するが、落下高さ(1.5m以下)を確保するために、3P側の事例では、上下にスライド可能な架設パイプの設置や扁平ホースを利用した。また品質管理として、打設時の層厚(50cm以内)や打ち重ね時間について記録表を用いて施工品質の管理を行った(写真-20)。

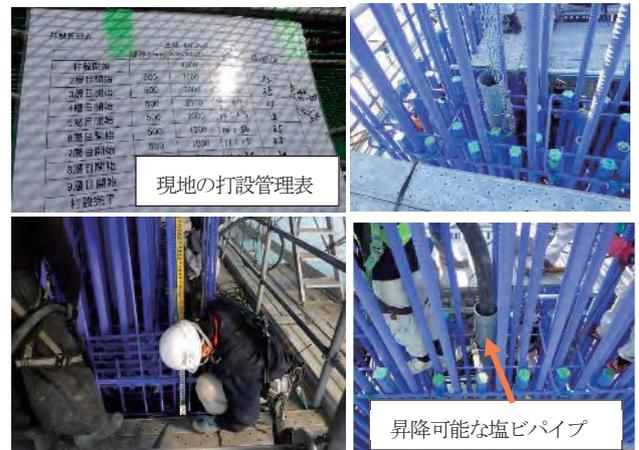


写真-20 Co打設時の施工・品質管理 (3P側)
Photo 20 Quality Control during Concrete Casting, 3P Side

コールドジョイント等の発生を心配したが、両工区共に水平材の一部（ひび割れ幅 0.15mm 以下）を除いて、柱本体にはひび割れの発生は確認されていない。

4P側では、塔頂高さ約130mまでについては、地上からの配管による圧送とした。荷下ろし地点から筒先までのスランプロス（ワーカビリティ低下等）が懸念されたため、夏場に打設した13リフト（約90m高さ）地点でスランプ値を確認したが、荷下ろし地点との差はほとんどなかった。

また、3P側においても配管による圧送段階の頃、コンクリートの管内圧力損失や圧送前後の品質変化を調査しているが、スランプ値の減少は認められていない。3P側での測定状況を写真-21に示す。

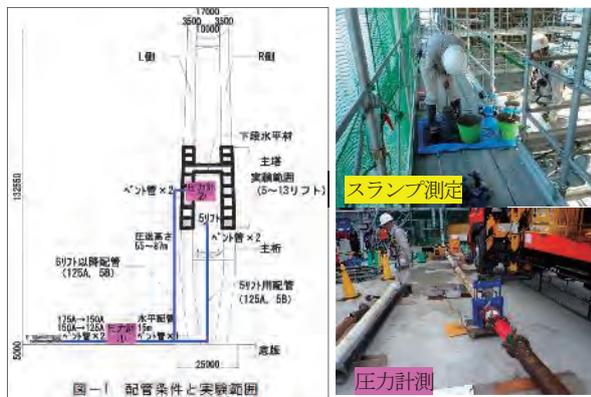


写真-21 高所 Co 圧送時の品質調査 (3P 側)
Photo 21 Quality Control for Pumping at High Place, 3P Side

参考までに、PC鋼棒の緊張(写真-16)後には、コンクリート表面に比較的大きな窪みのある定着跡ができる。両工区共に将来のコンクリート劣化に伴う剥落片等の落下対策として、当該部位を写真-22のような差し筋やネットにより付着力を確保した後埋め施工を施している。



写真-22 PC鋼棒緊張跡の対策 (3P (左) と 4P (右))
Photo 22 Measures for PC Tendon Marks,

(5) 水平材の施工

水平材は、大規模地震時に軽微な損傷（曲げ破壊が先行する）を許容することで、塔柱の断面力（弾性範囲内で設計）を軽減する役割を担っている。

当初、水平材を塔柱（ $\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$ ）とは別の施工ブロックとし、必要な材料強度（コンクリート：

$\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ 、主鉄筋： $\sigma_y=600\text{N/mm}^2$ 以下）を設定していたが、再検討を行った結果、水平材を塔柱と一体施工とすることで、塔柱の拘束によるひび割れ発生リスクの低減や、施工性が大幅に改善された。写真-23 に 4P 側の一体施工によるコンクリート打設状況を示す。なお、損傷形態として支配的なのは主鉄筋の降伏のため、この要求性能（ $\sigma_y=600\text{N/mm}^2$ 以下）を満足する鉄筋材料を使用した。



- ◇ 配筋: 打ち継ぎ面の継手を削除し、位置や種別を変更
- ◇ Co 打設: 配温式のパイプクーリングの実施

写真-23 下段水平材の塔柱一体 Co 打設 (4P 側)
Photo 23 Casting for Lower Horizontal Member, 4P Side

また、3P 側の上段水平材は、技術提案の履行として水平材を三分割し、フライアッシュを混合すると共に、中央ブロック打設には、フレッシュコンクリートに窒素冷却を行うことで、温度ひび割れの発生を防止する手法を採用した(写真-24)。



写真-24 上段水平材の分割施工と冷却状況 (3P)
Photo 24 Divided Work and Cooling for Upper Horizontal Member

なお、各水平材の下面や側面には、当初から剥落対策(写真-25)を行うと共に、事後点検が可能な管理路（スペース）を設置している。



写真-25 剥落対策シートの設置例（下面と側面）
Photo 25 Installation of Anti-peeling Sheets

5. PC桁の施工

5.1 張り出し部の施工

図-11にPC桁部（桁高2.5m×幅員11m）の施工ブロック割を示す。主塔橋脚上の柱頭部（L=12m）を施工し仮固定した後，移動作業車（以下「ワーゲン」という。）で両側へ1ブロック4mずつ同時に張出し，片側14ブロックをPC桁閉合部（鋼桁との接合部）まで，片持ち状態のバルランシング架設で施工する。

図-12にワーゲンでの施工手順をステップ図で示す。斜材の定着部が2ブロック（8m）に1か所の配置となっている。定着ブロックは，1サイクル当たり約2週間をかけて張り出し部の架設を行った。また，定着管の設置，横桁のPC鋼材等配置が無い一般部については，定着ブロックより2～3日短縮した工程で施工が行なわれた。

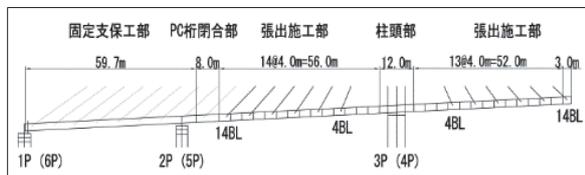


図-11 PC桁の施工ブロック割
Fig. 11 Divided Blocks for PC Girder

写真-26に施工途中（【ステップIIの主桁の製作】）の状況を示す。上床版から突き出ているのがPC鋼棒とシースで，横桁にもPC鋼線用シースが敷設されている。



写真-26 ワーゲン上での配筋作業（3P側）
Photo 26 Rebar Arrangement on Wargen, 3P Side

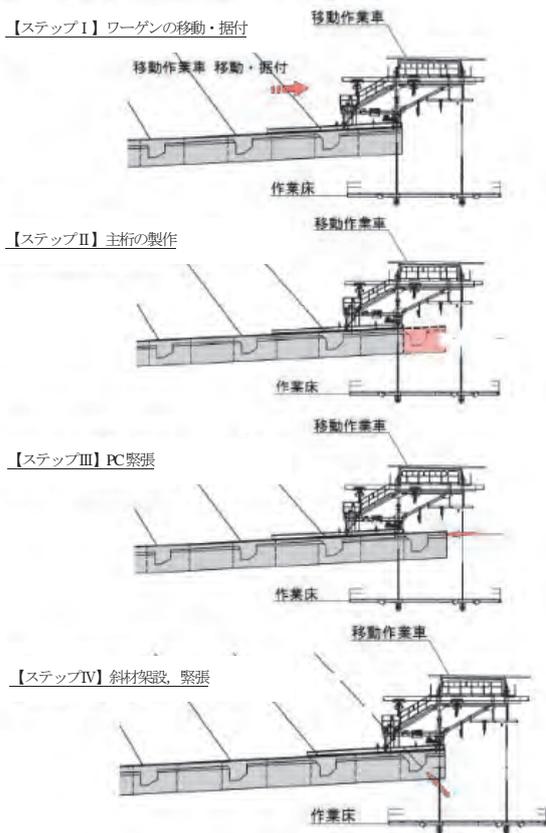


図-12 ワーゲンでの施工手順
Fig. 12 Work Procedure on Wargen



写真-27 1工区のワーゲン構造（2主桁）
Photo 27 Wargen Structure in the First Work

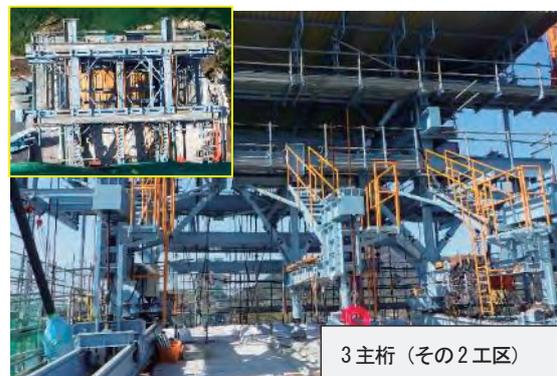


写真-28 2工区のワーゲン構造（3主桁）
Photo 28 Wargen Structure in the Second Work

なお、ワーゲンの構造は、その1工区では2主桁（トラス）、その2工区では3主桁（トラス）のワーゲンが使用された(写真-27, 28)。

箱桁断面のコンクリート打設手順は、その1工区（スランプ15cm）では下床版を先行して1層目（全2層）を打設(写真-29)した後、ウェブの1層目を打設する。その2工区（スランプ12cm）では、各ウェブから1層目を先行打設し、2分の1程度の高さまで打ち上げた後、下床版に筒先を置いて打設している。



写真-29 1層目は下床版で次はウェブへ (3P側)
Photo 29 Casting Lower Slab to Web, 3P Side

PC桁についても、温度応力解析を行い、新旧の打ち継ぎ目や横桁、マンホール部等に発生する引張応力に対して、膨張材の添加と鉄筋応力度による制御を基本とし、補強鉄筋を追加配置した。なお、両工区共にどのブロックにもひびわれは認められなかった。

5.2 側径間固定支保工部の施工

両工区共に、地耐力の確認を行い設計時の支保工を変更（支柱数の増加等）し、より沈下やたわみの少ない構造としている。また、温度応力解析により、その1工区では鉛直方向に3リフト、その2工区では前後と上下で4リフト（上段2ブロックに膨張剤添加）に分割して、コンクリートを打設（写真-30）した。打設中は、支保工支柱部に取り付けたターゲットを観測し、沈下や急激な変位等の異常が無いことを計測監視している。写真-31にその1工区で使用された自動計測設備を示す。

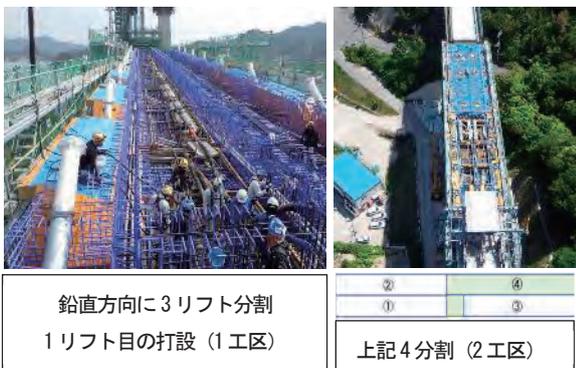


写真-30 固定支保工のCo打設割
Photo 30 Concrete Casting for Fixed Temporary Support



自動計測設備

写真-31 側径間固定支保工部の計測 (3P側)
Photo 31 Measurement for Temporary Support of Side Span, 3P

5.3 PC桁閉合部の施工

側径間の片持ち架設部と固定支保工による架設部との間に、長さL=8mの閉合ブロックを設けている(図-11)。打設量の平準化と温度ひび割れの低減を図るため、その



CO打設状況

写真-32 閉合部8mの吊支保工区間 (3P側)
Photo 32 Falsework for Closing Part of 8m, 3P

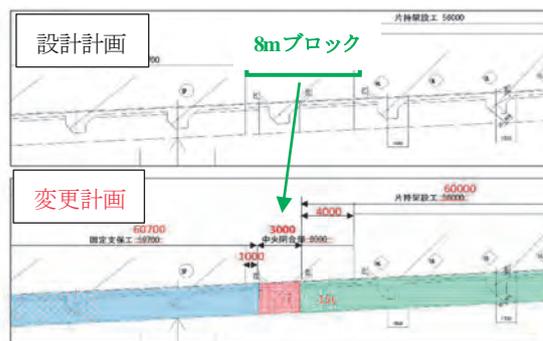


図-13 閉合ブロック8mから3mに変更 (4P側)
Fig. 13 Closing Block Length was revised 8m to 3m, 4P Side

1工区では、計画長を上下2分割にしてコンクリートを打設した(写真-32)

一方、その2工区では、片持ち架設部を1ブロック(4m)延長し、固定支保工側の延長も1m長くすることで、閉合ブロック長をL=3mに変更して施工した(図-13)。

両ブロック共に、温度ひび割れ防止用に補強鉄筋を追加したが、主桁のひび割れは確認されていない。

なお、架設当初に設置した柱頭部の仮固定は、側径間PC桁閉合部と中央径間接合部の施工が完了した後に撤去された。

5.4 作業構台

両工区共に、揚重設備は主塔横に設置したタワークレーンが主体となる。資材の搬入が容易で、タワークレーンの作業範囲内に作業構台を構築し、鉄筋・鋼材類の吊り上げに使用することで、限られたスペースを有効活用した(写真-33)。



写真-33 作業構台からの鉄筋吊上げ (右が4P側)
Photo 33 Rebars Lifting UP from Working Platform

5.5 生コンプラントでの膨張材投入

参考までに、膨張材の投入方法は、3P側の岩城島にあるプラントでは、地面からの圧送装置を利用し(写真-34)、4P側の弓削島にあるプラントでは、ミキサー近傍で人力投入により行った。



写真-34 膨張材の投入 (圧送装置使用: 3P側)
Photo 34 Injection of Expanders, 3P Side

6. 接合部の施工

6.1 接合部の構造

接合部は、主桁の断面形状が異なる鋼桁とPC桁の応力伝達をスムーズに行う構造として、生口橋や生名橋と同様に中詰めセルを利用した後面板方式を採用し、中詰めセル内には上下面にスタッド、側面は剛性が高く作業スペースが確保できる角鋼ジベルを配置している。写真-35に接合部の構造図とその1工区の仮組検査時の断面写真を示す。写真に示す赤枠箇所(矢印)が隔壁で仕切られた中詰めセル部分で、図中では緑色で示している。

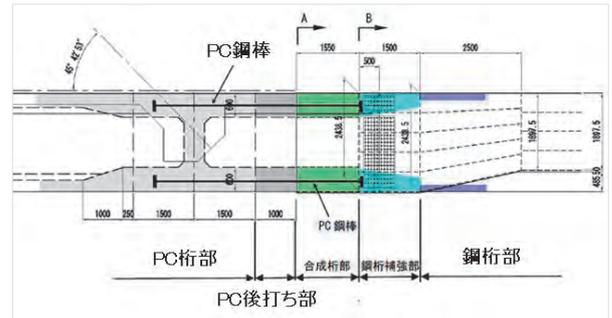


写真-35 接合部構造(上)と断面写真(下)その1工区
Photo 35 Structure of Joint and Its Section

6.2 中詰めセル内の施工

中詰めセル内のコンクリートは、これまで流動性が高く、かつ隙間の無い密実なコンクリートとするため、無収縮剤添加のコンクリートが使用されている。本橋では、膨張材による試験練りを行い、生口橋や生名橋で実施した拘束膨張試験での膨張性や収縮性能(材令35日で -120×10^{-6} 以下)を踏襲、確認した上で、スランプ21cm \pm 3cm、ブリージング率0.5%以下となるコンクリートを採用した(写真-36)。



写真-36 中詰めCo試験練り(その1工区)
Photo 35 Trial of Concrete to Be Packed in

セル内の施工は、その2工区は製作工場で完成状態にして海上輸送した。その1工区では、立て起こした状態で海上輸送し、現地ふ頭の台船上で配筋（籠状に組んだ鉄筋を挿入）作業とコンクリート打設を行い、十分な養生期間を経た後、近隣造船所の大型クレーンで桁を反転し架設姿勢に戻した。写真-37にその1工区（3P側）のコンクリート打設状況と反転後の接合部の断面を示す。



写真-37 中詰めCoの打設と反転後 (3P側)
Photo 37 Casting of Concrete Packed, 3P Side

6.3 接合部の架設

架設は、重量約70tの接合桁を改造したワーゲンで吊り上げた後、作業床に設置した。吊り上げ設備もジャッキ方式（その1工区）とウインチ方式（その2工区）との違いがあり、またその1工区では接合桁を改造ワーゲンの中を抱き込むように吊り上げ固定した(写真-38, 39)。



写真-38 改造ワーゲンによる接合桁架設 (3P側)
Photo 38 Erection of Jointed Girder with Modified Wargen



◇センターホールジャッキとPC鋼より線で、吊上げ吊下げを連続的に行うチャッキングシステム

写真-39 接合桁吊上げ用のジャッキ設備 (3P側)
Photo 39 Jacking for Lifting Jointed Girder, 3P Side

接合部は、以後の鋼桁架設の発進基地であり、この据付け精度がその後に影響を及ぼす。据付け時から間詰コンクリートの施工完了まで、近傍の重機の配置位置の影響も含めきめ細かな計測管理を行う(写真-40)と共に、調整ジグも3次元的な調整機能を持つジャッキ設備や、上・下床版に専用の調整ジグを用いての微調整が行われた。また、本四連絡橋の斜張橋の施工で行われたようなブラケット等の固定支保工上の施工ではないため、コンクリートの打設に備え、ワーゲンの型枠にも剛性の高い梁等が用いられた。



写真-40 間詰部のCo打設と計測状況 (3P側)
Photo 40 Concreting for Filled in and Measurement, 3P Side

接合桁の据付け後は、鉄筋配置を行うスペースとなる間詰部（1m）の施工を行う。間詰部のコンクリートは、両工区共に温度応力解析結果に基づき補強鉄筋を追加した。

使用したセメントは、3P側はPC桁張出し部と同じ早強ポルトランドセメント（40-15-20H（膨張材））、4P側は中詰め部と同じ普通ポルトランドセメント（40-12-20N（膨張材））で、桁の左右のバランスを確保するように打設手順に配慮して、コンクリート打設が行われた。硬化後には、地震時や架設時に備えて配置されているPC鋼棒の最終緊張、グラウト注入を行い、PC桁と鋼桁一体の接合部が完成した。なお、両工区共に完成後にひび割れは確認されていない(写真-41)。



写真-41 間詰部の配筋と完成状態 (4P側)
Photo 41 Rebar Arrangement for Filled in and Completion Status

6.4 ワーゲンの撤去

施工を終えたワーゲンは、通常では柱頭部付近まで後退して解体が行われる。本橋（斜張橋）は、進行に合わせて順次斜材を架設しており、後退時には斜材とワーゲンが干渉する。このため、その2工区では、海上部の施

工位置から作業床を台船上に吊り下ろす方法が採用された(写真-42)。一方、その1工区では、ワーゲンを上下に分割して、斜材架設で使用した作業足場(後退装置)に合体させて主塔近傍まで後退(写真-43)し、桁上で一部解体し陸上へ吊り降ろされた。



写真-42 ワーゲン床の吊下げ撤去(4P側)
Photo 42 Removal of Wagen Floor, 4P Side



写真-43 ワーゲンの分割と後退(3P側)
Photo 43 Division and Setback of Wagen

参考として、架橋地点と各台船の係留先である「長江港」,「生名港」との位置関係を図-14に示す。



図-14 架橋地点と各島のふ頭(港)位置
Fig. 14 Construction Site and Location of Quay

7. 鋼桁の製作架設

7.1 鋼桁構造

一般部の断面図を図-15に示す。鋼床版デッキプレート¹⁾の厚さは $t=16\text{mm}$ (H24道示)で、現場架設時の添接部

は、鋼床版は溶接、その他(腹板・下フランジ・縦リブ)は高力ボルト接合である。鋼桁の1ブロック長は、定着部間隔の17.5m(6ブロック)と20m(2ブロック)の他、両サイドに若干短い(14m前後)ブロックで構成され、重量は1m当たり5t程度で、1ブロックの重量は約60t~100tである。

鋼桁外面の防錆はAl-Mg溶射(アルミニウム・マグネシウム合金溶射)とし、それに合わせて内外面を添接する高力ボルト(S10T)も外面側はボルト頭部を溶射の仕様としている。

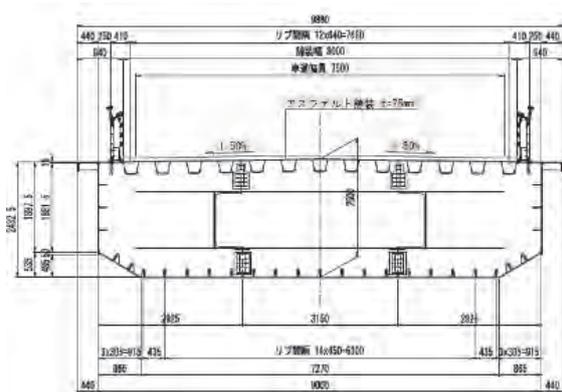


図-15 鋼桁一般部の断面図
Fig. 15 Section of General Part of Steel Girder

7.2 試験施工

鋼床版の現場溶接に伴う収縮量について、その1工区では、技術提案により、事前に工場内で実物大試験体による溶接施工試験(ガスシールドアーク溶接+サブマージアーク溶接)を行い、溶接収縮量(実測値 $\delta=2\text{mm}$)を溶接キャンバー量に反映した(写真-44)。なお、その2工区でも収縮量は2mmと設定している。



写真-44 実寸大の鋼床版現場溶接施工試験体(3P側)
Photo 44 Full-Scale Steel Deck, in-situ Welding Test Specimen

7.3 仮組立

鋼桁は、片側工区当たり接合桁と10ブロックから構成されるが、その1工区は長崎、その2工区は千葉方面で製作され海上輸送された。工場内での仮組立は、両工区共

に図-16に示す3回に分割して行われた。全体の整合性を確認するため、前回の仮組立で確認が行われた端部のブロックについては、次回の仮組立時に再度重複して確認が行われた。工区境の閉合ジョイント（J11）は、両工区間で製作データの共有を行うと共に厳しい精度管理値としている。

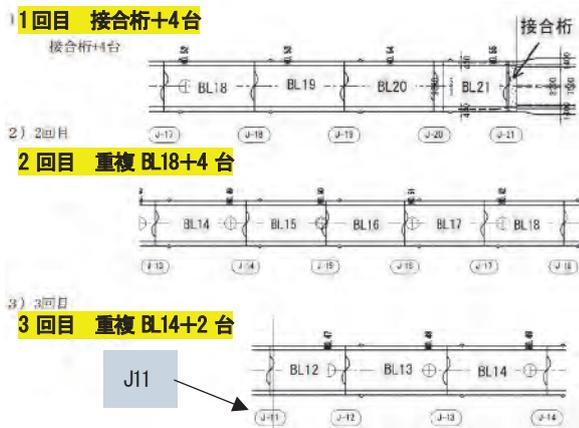


図-16 重複仮組立配置図（その2工区の例）
Fig.16 Duplicate Temporary Assembly Layout

7.4 輸送

製作工場から3000t台船により1回（隻）当たり3～4ブロックを積載し、最寄りのふ頭（港）岸壁まで海上運搬し、架設毎に現地に回航・係留を繰り返す。台船上のブロックが無くなれば、製作工場に帰港し次の輸送（合計3往復）に備えた。写真-45、46に各ふ頭での係留（初回時）とオーニング姿（シート養生）を示す。



写真-45 台船上の鋼桁とオーニング（その1工区）
Photo 45 Steel Girders and Awnings on Barge, the First Section



写真-46 台船上の鋼桁とオーニング（その2工区）
Photo 46 Steel Girders and Awnings on Barge, the Second

なお、架設前には各桁毎に水洗いや塩分測定（50ppm以下）を実施して、添接部の品質管理を行った。

7.5 架設

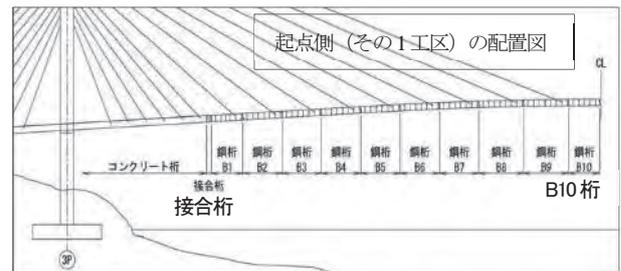
(1) 架設方法

鋼桁の架設は、接合部に接続する第1（B1, B20）ブロックと、橋上クレーン（EN：エレクションノーズ）については、2200t吊FC船にて架設し、以後のブロックは、閉合桁まで橋上クレーン（EN）による張出（直吊り）架設で行った。

架設工程を図-17に示すが、令和2年10月にその2工区（4P側）の第1ブロック（B20）架設を開始し、令和3年6月に閉合ブロック（B10）の架設が完了した。

潮流の影響から極小潮時を狙っての計画とし、両工区とも2週間に1度のペースで行った。途中に悪天候等で順延もしたが、天候にも恵まれおおむねスムーズな架設を進めることができた。

海中には、海底ケーブルが敷設されていることから、海底調査によりケーブル位置を特定すると共に、3P側でのFC船係留時は、浮遊式のホーサーロープを採用し、直上を揚錨船で通過することで海底ケーブルに接触することが無いように配慮した。また、送電線もあることから、FC船架設は全て北側一方向からの架設に統一して行われた。



	令和2年						令和3年						施工方法				
	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6		7	8	9	
品城側 (その1)	接合桁																台船架設
	B1																起重機船架設
	EN																
	B2																
	B3																
	B4																
	B5																
	B6																
	B7																
	B8																
B9																	
B10																	
生名側 (その2)	B11																
	B12																
	B13																
	B14																
	B15																
	B16																
	B17																
	B18																
	B19																
	EN																
B20															起重機船架設		
接合桁															台船架設		

図-17 鋼桁配置図（3P側）と架設の実施工程
Fig.17 Steel Girder Layout and Erection Schedule

使用するFC船の選定にあたっては、曳航途中の海域において、既設橋や送電線（海面からの高さ50m）の下を、ジブを下げた状態で通過できる機種を選定した（図-18）。

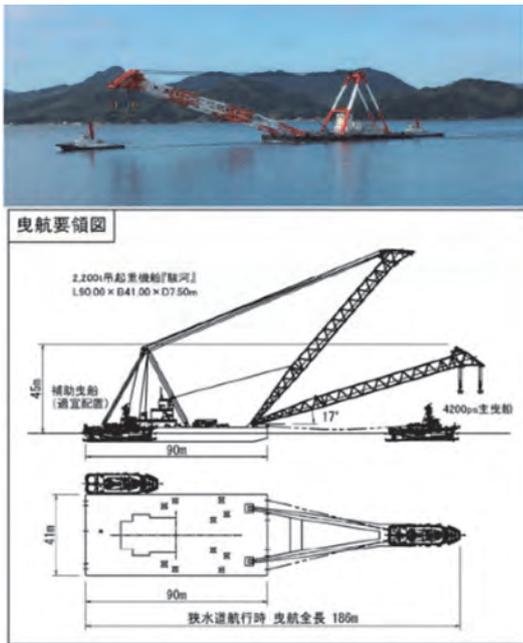


図-18 桁架設に使用したFC船
Fig. 18 Floating Crane Barge for Girder Erection

(2) FC船架設

第1ブロックは、岩城島側の長江港に停泊した台船上から前日に水切り、重心調整を完了させた状態で停泊した。当日朝に離岸した海域で吊り上げ位置まで巻き上げて、約1.5kmを吊曳航した後、所定に位置に架設した。

なお、日の出日没までの間に架設作業を終了させるため、前日に事前アンカーを設置した。写真-47に両工区における吊上げ状況を示す。その1工区では、作業（ラック式）足場も一緒に取付けて架設を行うことで、工期短縮を図った。



足場付きで架設 (3P側) 吊曳航途中 (4P側)

写真-47 FC船による鋼桁第一ブロックの架設
Photo 47 First Girder Block Erection by FC Barge

橋上クレーンは、両工区共に長江港で地組し、第1ブロックと同様にFC船により架設した。延長約L=40mと小規模の鉸桁橋に匹敵する規模の構造物を橋面上に一括架設した。斜材との離隔距離が少なく、橋上ではガイドやチルホールを使って、慎重な引き寄せ作業により軌条設備上に据付けられた。写真-48に3P側の架設状況を示す。



写真-48 FC船による橋上クレーンの架設(3P側)
Photo 48 Erection of Crane on Bridge by FC Barge

(3) 橋上クレーンの架設

写真-49~51に、その1工区及びその2工区の橋上クレーンの構造や施工状況写真を示す。その1工区はワイヤーロープ2本（双胴）でのウインチ方式、その2工区は4か所のジャッキ（ダブルツイン）設備による吊上げ方式である。両工区共に迅速で十分な精度のある架設となった。特徴としては、次の通りである。

全長約 35.9m, 高さ 8m, 重量約 200t



写真-49 橋上クレーン(3P側)
Photo 49 Crane on Bridge, 3P Side



写真-50 軌条設備(左)と吊上設備(右)(3P側)
Photo 50 Rail Equipment and Lifting Device, 3P Side

その1工区のウインチ方式は吊り上げ速度が速い。但し、事前に桁の架設勾配に合わせて台船上でも傾斜させ

て仮置きし、吊天秤にも所定の角度を付けた状態での架設となっている。一方、その2工区のジャッキ方式では、水平に設置した台船上の鋼桁を吊上げながら、4点独立の特性を生かし順次角度調整を行い仕口合わせが行われた。



架設時の吊上げ時間
 吊上げ高さ：最大 50m
 ジャッキストローク：300mm（連続）
 ジャッキ速度：0.7 m/min
 吊上げ時間：50 / 0.7 = 71.4 min

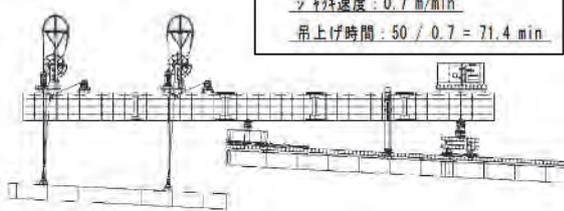


写真-51 橋上クレーンによる鋼桁架設(4P側)
 Photo 51 Steel Girder Erection by Crane on Bridge, 4P Side

橋上クレーン架設における鋼桁1ブロック当たりの作業項目と標準サイクル例を表-2に示す。

鋼桁架設作業内容	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目	10日目	11日目	12日目	13日目	14日目
鋼桁曳船・吊上げ	■													
仮添接	■													
架設工		■												
高力ボルト 先行本締め		■												
高力ボルト 後行本締め														
エレクションノーズ														
準備														
斜材 ケーブル工														
架設														
緊張														
溶接工														
溶接準備 シフトピッチ切替														
溶接 CO2(2層)+TIG(1層)														
非破壊検査														

図-19 橋上クレーン(EN)による桁架設の標準サイクル(その1工区の事例)
 Fig. 19 Erection Cycle for Girder by Crane on Bridge

1サイクルの所要日数は約2週間である。架設フローとして、鋼桁吊上げ当日にエレクションピースを用いた仮

添接を行い、下フランジと腹板の1/2程度を先行してボルト締めを行う(図-20)。翌日以降に風防設備(現場溶接作業用の風よけ設備)やL形ピース等による開先調整の後、鋼床版溶接を行い非破壊検査が合格したことを確認して、上半分の高力ボルトの本締めを行う。その後、斜材架設のスペースを確保するために橋上クレーンが後退し、側径間側の一次緊張を終えた斜材架設用の作業パーティータンが中央径間側の施工に着手する手順となっている。

鋼床版溶接は、その1工区はガスシールドアーク溶接(2層)後に、仮添接を撤去し、溶接用走行レールを敷設してサブマージアーク溶接(1層)を実施する。一方その2工区では、ガスシールドアーク溶接(3層)のみで鋼床版厚16mmの溶接を完成させる(写真-52)。

両工区共に風防設備を設けて慎重な施工を行ったが、風(微風でも)の影響を受けやすいガスシールドアーク溶接は、所定品質を得るために若干苦戦を強いられた。

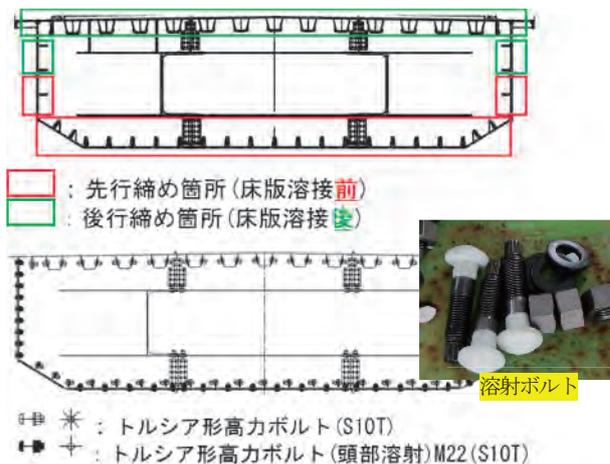


図-20 鋼桁施工手順とボルトの種別
 Fig. 20 Erection Procedure of Girder and Bolt Type



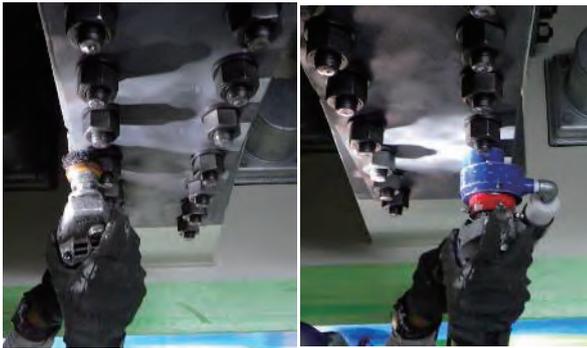
サブマージアーク溶接(その1)

ガスシールド溶接(その2)

写真-52 鋼床版の現場溶接(風防設備内)状況
 Photo 52 In-situ Welding for Steel Deck

なお、超音波探傷による非破壊検査手法については、AUT又はTOFDと手探傷(MUT)との併用で行われ、エコー高さ1/2L線内として鋼道路橋施工便覧の規定に基づき管理を行った。

箱桁内部の鋼床版，ボルト部にはプリストルブラスター他，各種のケレン工具が用いられ内面塗装を実施した(写真-53)。



添接・ボルト部 (カップブラシ，ボルトシェアー)

写真-53 桁内添接ボルトの素地調整
Photo 53 Surface Preparation in Girder for Bolting

(4) 閉合に備えて

閉合に先立ち，事前に両工区で現地の支間長や製作誤差についての再確認が行われた。鋼桁の長さ不足が生じないように両工区共に若干長めに(予長)製作し，B11桁のJ12支口(その2工区)で切断調整を行う計画としていたが，精査の結果，鋼桁部を切断することなく，現地停泊先の台船上において，開先加工(切削加工)のみで対応することとした(図-21)。

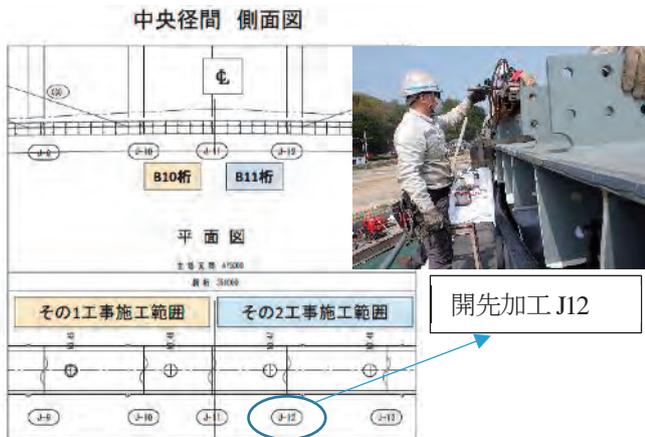
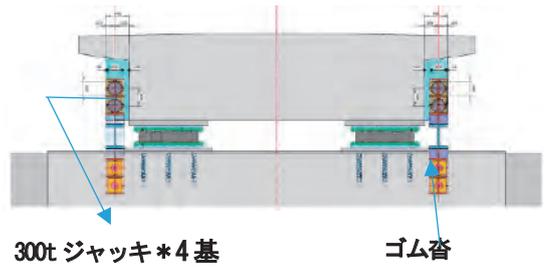


図-21 中央径間の継手位置と開先加工施工
Fig. 21 Joint Location and Beveling in Central Span

(5) セットバック

閉合桁は，当初その2工区(4P側) B11桁を予定していたが，両工区の工事進捗から，その1工区(3P側)のB10桁(ブロック長13.75m)が最終ブロックとなった。架設に先行して架設遊間(100mm×2)を確保するため，各主塔部でセットバックを行った。設計時は，主塔部のLRB支承の下杓とベースプレート間で滑らせる計画としていたが，すべり面跡の損傷や防錆上の配慮から，両工区共に別の手法が採用された。3P側は，完成状態でLRB杓を据え付け，PC桁ウェブに設けたコンクリート突起

部で，300t油圧ジャッキ4基を用いてゆっくりとせん断変形させる方式とした(写真-54，55)。



300t ジャッキ*4基

ゴム沓



写真-54 セットバック用ジャッキ設備(3P側)
Photo 54 Jacking Device for Setback, 3P Side



写真-55 ゴム沓のせん断変形状態(3P側)
Photo 55 Shear Deformation of Rubber Bearing

また，側径間(機能分離型支承)の1P，2P橋脚上では，ゴム支承アンカー用のボイド形状を変更して，施工時にスライド可能な構造とし，鋼桁施工完了後にボイド内をモルタル充填した。支承の種類と配置を図-22に示す。



図-22 支承の種類と配置
Fig. 22 Type and Layout of Bearings

(6) 閉合桁の架設

架設日の2日前に3P側，前日に4P側のセットバックを実施し，当日は鋼桁の伸びの影響が少ない早朝に，3P側の橋上クレーンにより架設した。

写真-56に架設当日において，3P側からの吊上げ後の状態を示すが，橋上クレーンの重量もあり4P側との段差

は大きい。

その1工区では橋上クレーンの解体、ケーブルの張力調整、両者による測量立会、セットフォー等の作業を経て、約1か月の後、その2工区において、鋼床版上や桁内下フランジ上に配置したセンターホールジャッキ等を使って、桁の引寄せ作業(写真-57)と継手部の仕口合わせが行われた。その後は、一般部と同様にボルト添接、鋼床版溶接など一連の作業を行い、両工区の桁が閉合した。

(7) 現場塗装 (金属溶射)

添接部の塗装作業のうち、鋼床版の舗装止め板から外側に接する上下面 (外面) は、現場でのプラストを行い、試験施工の後、Al-Mg溶射を実施した。その後、ハケ塗により封孔処理や上塗塗装が行われた。写真-58に3P側での溶射作業 (プラズマ溶射) 等を示す。



写真-56 ENでの架設 (左), 4P側との段差 (右)
Photo 56 Erection by EN and Gap with 4P Side



写真-57 橋面上での桁引き寄せ作業 (その2工区)
Photo 57 Pulling Operation of Girder

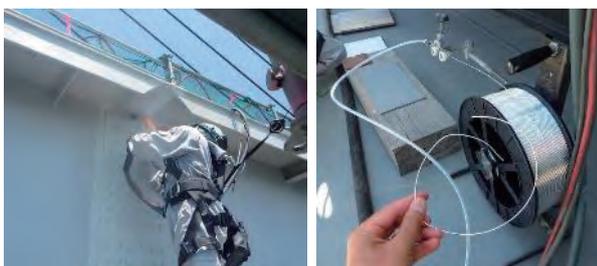


写真-58 溶射作業と合金線材 (φ1.6mm) (3P側)
Photo 58 Thermal Spraying and Alloy Wire, 3P Side

8. 斜材の施工

8.1 構造

斜材は、ストランド単位での運搬、架設及び緊張管理が可能な現場収束型ノングラウトケーブルである。

ストランドは、図-23に示すように亜鉛めっきPC鋼より線 (7本より15.6mm) の表面にグリースとポリエチレン樹脂による3重防食を施したストランドを所定本数架設し、保護管内で束ねることで1本の斜材を構成する。本橋では、3種類の収束ストランドが使用され、斜材の本数は、1主塔の両径間に1面当たり15段ずつの配置で、全本数は120本となる。

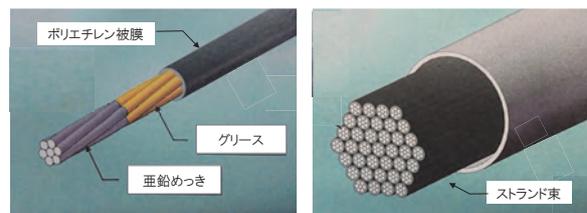
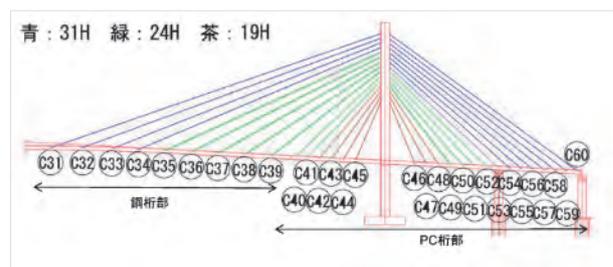


図-23 ストランドの構成 1本 (左) と収束 (右)
Fig. 23 Strand and Convergence

図-24に主塔近傍から3種類のストランド配置図と諸元表を示す。写真-59には、工場製作 (プレファブ) 型の「多々羅大橋のケーブルドラム (φ3.0m~4.7m 重量7.5t~62.9t)」と、本橋の「現場収束型 (φ約1.5m以下 重量2t以下)」との対比を示す。なお、本橋でプレファブ型を適用した場合、直径φ113cm、重量は13tと算出されている。



断面構成	ストランド (1本)	19本	24本	31本
断面図				
断面積	146.5 mm ²	2783 mm ²	3516 mm ²	4541 mm ²
引張荷重	261 kN	4959 kN	6264 kN	8091 kN

図-24 斜材配置 (上) とストランド諸元表 (下)
Fig. 24 Cable Arrangement and Table for Strand Dimension



写真-59 現場収束型（左）と工場製作型（右）
Photo 59 On-site Convergence Type and Factory Production Type

定着構造に関して、主塔、桁側のそれぞれのストランド架設が完了し、二次応力低減用の緩衝材を設置した施工状況を写真-60, 61に示す。なお、PE保護管表面にはケーブルパイクレーション対策としてUストライプ加工が施されている。



写真-60 主塔定着部 外側（左）内側（右）
Photo 60 Anchor Part, outside and inside Tower



写真-61 桁側定着部 橋面側
Photo 61 Anchor Part, Girder Side

8.2 架設

架設は、PE保護管に第一ストランドを挿入して同時に吊上げ架設し、それをガイドとして残りのストランドを1本ずつ架設していく「保護管先行方式」である(図-23)。写真-62に斜材架設時の橋上設備を示すが、緊張は桁側でシングルストランドジャッキを用いて行った。

架設手順を以下に示す。

- 1) 事前に、1本当たり10mで搬入する保護管を地上又は橋面上で所定の長さで溶着する(写真-63)。
- 2) 溶着した保護管内に第一ストランドを挿入し、一緒にタワークレーンで吊り上げ、塔側でウェッジ(くさび状の部材)によりストランドを定着する(写真-64, 65)。

長い保護管内への第一ストランド挿入には、パイロットロープとしてテグスやビニールひもを使用し、簡易送風機を用いて作業が行われた。

- 3) 主桁側でストランドを橋面上のクローラークレーン等で介添えをしながら、ウインチで桁側の定着部に引き込み、ジャッキで緊張する(写真-66)。

クローラークレーンによる介添えに伴う工事車両の往来や作業スペース等も考慮のうえ、橋上クレーンの構造寸法が計画されている。

- 4) 保護管内にワイヤーを主塔から通し、上下に移動できる連動ウインチに接続する(図-25)。
- 5) 桁側でワイヤーに取り付けられたスレッダー(接続具)に2本目のストランドをセットして、保護管内を主塔まで引き上げ、管口で盛替え、塔内に挿入し定着する(写真-67)。
- 6) 桁側でストランドをカッティングベンチ上で切断し、桁側定着部に挿入し緊張する(写真-62)。
- 7) ワイヤーのスレッダーを上から桁側に戻し、5)以降を繰り返すことで、1段分の斜材架設(一次緊張)が完了する。

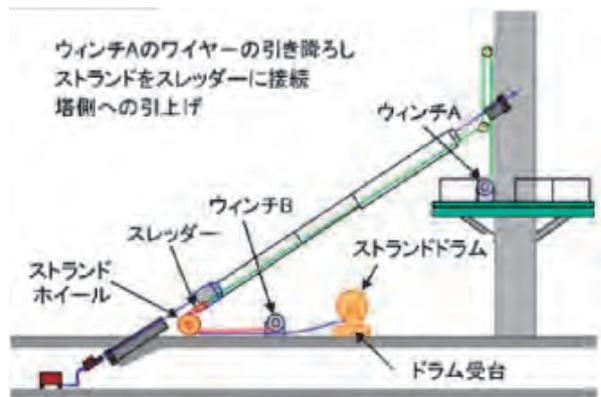


図-25 斜材の架設要領図(ストランドの架設)
Fig. 25 Outline of Strand Erection



写真-62 斜材架設設備の配置
Photo 62 Layout of Strand Erection Facilities

以下に施工状況の写真を示す。



写真-63 PE保護管の溶着（接続）
Photo 63 Welding of PE Protection Tube



写真-64 第一ストランドの挿入状態と架設
Photo 64 Insert and Erection of the First Strand



写真-65 主塔内の定着（左） ウエッジ（右）
Photo 65 Anchor Part inside Tower and Wedge



写真-66 桁側のシングルジャッキでの緊張作業
Photo 66 Tension Operation by Single Jack, Girder Side



写真-67 ワイヤに接続するスレッダー
Photo 67 Threader Connected to Wire

8.3 斜材の緊張管理

緊張管理は、第一ストランドの塔側（固定側）にロードセル(写真-60の右側)を設置し、その値を用いて緊張力を監視する「張力管理方法」である。監視は、パソコンの他、現地でリアルタイム的に確認できるよう携帯電話やタブレット端末が利用された。

なお、緊張作業は、初めにシングルストランドジャッキで1本づつ緊張力を導入するため、主塔や主桁の弾性変形、斜材のサグの影響が架設緊張中に発生する。この影響によるストランド間の張力のばらつきを最小限にするため、緊張作業は1次緊張と2次緊張に分けて実施した。これらの影響は、1次緊張時に実測し、2次緊張時に実測データを踏まえて所定の張力が導入された。また、2次緊張時には標準温度時に所定の張力となるよう温度補正を行い、緊張中に温度変化の影響を受けないように、外気の変動が少ない早朝に作業を実施した。1次緊張時は左右の張力差が大きくなる範囲で片側づつ（導入張力の70%程度）緊張し、2次緊張は左右の誤差を極力少なくするため、左右同時に緊張作業を実施した(写真-68)。

緊張時の概念図を図-26、27に示す。

その他、サグによる緊張方向の違い、斜材のリラクセーション、セットロスによる影響の他、緊張前に実施したジャッキとロードセルとのキャリブレーション（誤差調整）値も考慮されている。



片側づつ3本程度連続で緊張

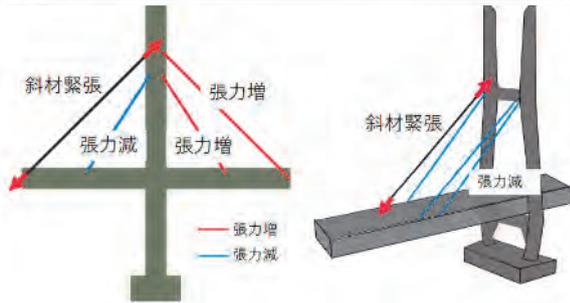


早朝から両側を同時に緊張

写真-68 1次緊張（上）と2次緊張（下）
Photo 68 First Tension and Second Tension

2次緊張後の張力管理値は、最終ストランドの荷重計値（ロードセル値）に所定本数分乗じることで、斜材1段（1本）分の張力値となる。

斜材の緊張による別斜材の張力への影響
斜材の緊張により、同方向または別方向の斜材に緩みあるいは緊張が発生。

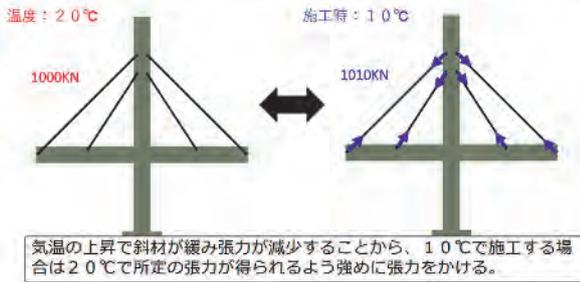


【上図は、提出資料等から抜粋し概念図として作図】

図-26 斜材緊張時の弾性変形 概念図

Fig.26 Inspection of steel deck by developed system

斜材の温度変化による張力への影響
岩城橋の設計計算では斜材の温度は20℃に設定している。
施工時の斜材温度を計測し、所定の張力が得られるよう温度補正を行う。



気温の上昇で斜材が緩み張力が減少することから、10℃で施工する場合は20℃で所定の張力が得られるよう強めに張力をかける。

【上図は、提出資料等から抜粋し概念図として作図】

図-27 斜材緊張時の温度の影響 概念図

Fig. 27 Temperature Impact during Strand Tensioning

8.4 斜材張力調整

本橋では、張出架設中と鋼桁閉合後の構造系完成時に、斜材の張力調整を実施した。

PC桁の張出架設では、最下段から数本は斜材角度（鉛直分力）が特に大きいため、柱頭部を中心に弓形状態にもなり、PC桁の下床版に引張応力が発生する（図-26）。斜材の緊張力が大きいと架設毎に順次蓄積されるため、途中で後方の斜材張力を緩めること（張力調整）が必要となる。



図-28 斜材架設時の桁の挙動イメージ図

Fig. 28 Girder Behavior during Cable Erection

張力調整には、張力の引戻し（減少させる）や増引き（増加させる）作業があるが、いずれも緊張はマルチジャッキを使用し、定着ブロックのリングナットの位置を移動させることでストランドを一括調整した（写真-69）。（なお、シングルジャッキでの引き戻し作業の場合、ウエッジによる噛み合わせ損傷が残置される可能性があり実施していないとのこと。）

調整作業の結果、両工区で傾向に若干違いはあるものの、ケーブルの許容値を超過すること無く、ほぼ構造系完成時の設計（目標）値に近い斜材張力値となっている。

調整完了後には、工事期間内で制振装置の取付けや防錆剤（ウレタン系）注入等の作業を行い斜材定着部を完成させた。



写真-69 マルチジャッキでの緊張（張力調整）

Photo 69 Tensioning by Multi-Jack

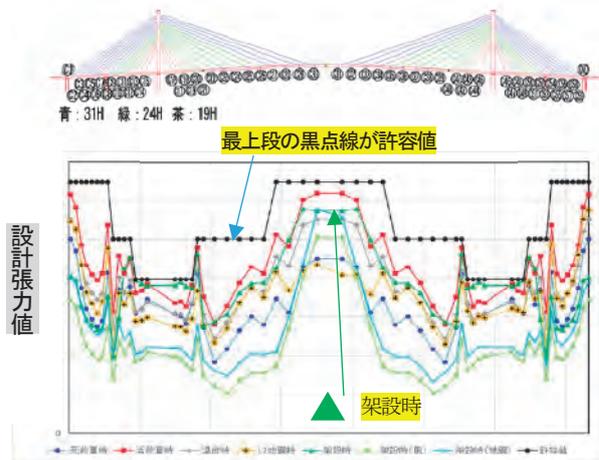


図-29 設計時の斜材張力値（イメージ図）

Fig. 29 Cable Tension Value during Design

図-29に各斜材箇所における荷重別の設計張力（死荷重、活荷重、温度時、L2地震、架設時等で常時換算）値をイメージ的に示す。最上段の黒線が許容値（斜材3種類）である。両端の固定支保工を除く張出架設区間では、活荷重時（赤線）に次いでほぼ架設時の張力値（緑△線）が大きい。

9. 形状管理計測

主塔、PC桁、鋼桁及び斜材ケーブルの各架設段階及び架設完了後に、橋体の形状や応力状態を計測し架設精度を確認すると共に、完成後に有害な誤差が残らないようケーブル張力で調整する。

図-30にその2工区による架設時の施工管理フローを、図-31には主塔部等の計測設備配置例を示す。

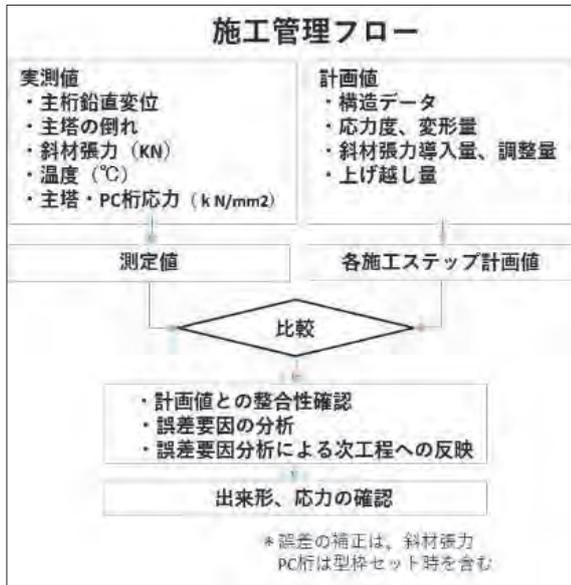


図-30 形状(施工)管理フロー(その2工区)
Fig. 30 Shape Control Flow

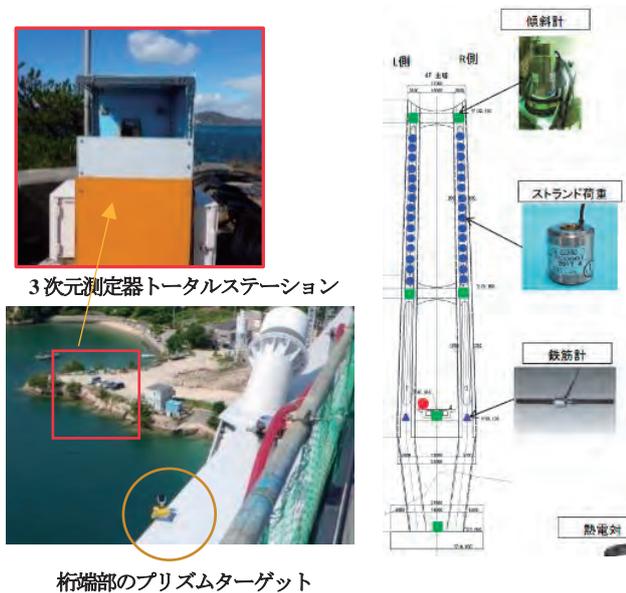


図-31 主塔部などの計測設備(4P側)
Fig. 31 Measurement Facility for Tower, 4P Side

また写真-70に、その1工区の現場事務所内に配置された常時モニター画面をイメージ写真として示す。上段が桁高、中断の両サイドに主塔斜材の張力(ロードセル)値、下段に応力や傾斜状態が表示、監視されている。

表-2には本橋の各部位での管理目標値を示す。



写真-70 計測管理用のモニター画面(その1工区)
Photo 70 Monitoring Display for Measurement

表-2 各部位の管理目標値
Table 2 Targeted Value for Each Element

項目	管理目標値(mm)	摘要
主塔倒れ量の誤差	±H	H: 主塔高(m)
主桁鉛直変位の誤差(側径間)	±(25+L)	L: 支間長(m)
主桁鉛直変位の誤差(中央径間)	±(25+L/2)	L: 支間長(m)

張上架設中の主桁変位(最大時)について、その2工区(4P側)の計測結果から、鋼桁最先端部は100cmを超える上下動、PC桁張出部は10cm前後、PC桁固定支保工部は5cm以下の微動的な動きとなっている。

また、RC主塔の上段水平材部(R側)の時系列変位挙動を図-32に示すが、鋼桁架設、ENの解体で大きな変化(倒れ)が生じているが、その移動量は10cm前後である。

なお、これらのデータは、桁架設工事の施工業者において「構造系完成時」までデータ収録が行われており、舗装等の橋面工完成(死荷重時)以降については計測が行われていない。今後、臨時点検等でケーブル張力の実測値が必要な場合に備えて、ロードセルは接続ケーブルと共に、主塔内に存置されている。

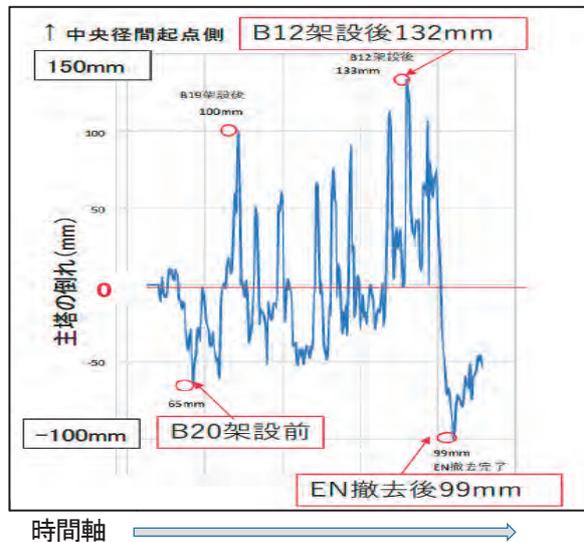


図-32 主塔水平材上段R側の変位計測(4P側)
Fig. 32 Displacement of Upper Horizontal Member, 4P Side

10. 取付橋梁等

岩城橋の取付高架橋を含めた橋梁一般図を図-33に示す。高架橋の橋梁形式は全て「PC（単純又は連結）コンポ橋」である。岩城島側の1橋（橋長L=140.5m（4径間））はセグメント方式、生名島側の2橋（1号橋は橋長L=40.5m（単径間）、2号橋はL=134m（3径間））は、現場での製作方式で施工された。供用後の「岩城橋」は、岩城島側と生名島側の1号橋を合わせた橋長L=916mが対象区間となっている。

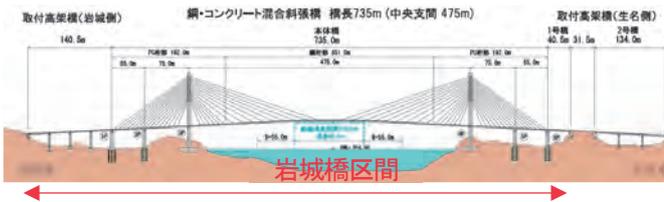


図-33 岩城橋全体の橋梁一般図
Fig. 33 General View of Iwagi Bridge

岩城島側の架設状況を写真-71に示す。橋脚上に設置した門構による架設で、この後プレキャストPC板の敷設、床版上の配筋、コンクリート打設等を行い完成となる。なお、生名島側の2号橋（本橋範囲の区間外）は、曲線区間に径間長L=約45m×3径間、桁高2.7mの規模で計画された。桁架設は、各橋脚の地上部から架設構台を構築しての施工で技術的難易度の高い工事となった(写真-72)。



写真-71 岩城島側のPCコンポ桁架設状況
Photo 71 Erection of PC Compo-Girder, Iwagi Island Side



写真-72 主桁の製作（左）、架設用構台（2号橋）
Photo 72 Fabrication of Main Girder and Erection Platform

本報告の最後に、側径間橋脚の大口径深礎杭基礎を紹介したい。写真-73、74は、生名島側の5P橋脚施工時の状況を示す。杭径φ9.5m、深さL=24mの大規模なもので、掘削が進むにつれ昇降梯子を上がり降りしながら、岩盤状況や吹付コンクリート、ロックボルト挿入等数多くの立会に参加した。特に当該基礎は「ひん岩」の混入が想定されており、掘り進む度に範囲を特定していった。その結果、事前にボーリングデータから推測され、設計面に反映（定数低減）された範囲とほぼ同規模であったことに安堵すると共に、労力を顧みず協力頂いた関係者の存在等、思い出深い現場となった。



写真-73 深礎杭掘削時の坑口と設備(5P)
Photo 73 Entrance and Facility for Deep File Foundation



写真-74 削孔や岩盤確認（左）、5P正面図（右）
Photo 74 Excavation and Bearing Check, 5P Foundation

11. おわりに

本稿の作成にあたっては、筆者と共に岩城橋建設工事に研修員として参加させていただいた当社若手技術者達の作成資料も随所に活用させていただいた。長期間に及ぶ岩城橋建設工事の工事概要について、工事監理支援の担当技術者からの視点で網羅的に紹介したが、説明が不足する点等については、ご容赦をいただきたい。

本橋は、RC主塔、混合桁、複合斜張橋といった特徴を有する斜張橋であり、クリープ・乾燥収縮といった挙動についても、技術的関心を持って工事に参画していたが、現時点で十分に報告できるだけの情報及び成果をも

ち合わせていない。これらについては、今後の工事関係者等の分析や報告に期待したい。

さて本橋は、ゆめしま海道3橋の最後の1橋として供用を迎えた。何方かが述べた「造った人，使う人，訪れる人，それぞれの思いと夢をのせた架け橋」として，又上島町の魅力ある景観ポイントとして，岩城橋が大いに親しまれ利用されることを祈念いたします。

謝辞

本稿を投稿するにあたり，これまでご指導，ご協力頂いた愛媛県今治土木事務所の担当職員，工事関係者の皆様には深く感謝申し上げます。

特に，拙文の内容確認や助言を賜りました，愛媛県今治土木事務所上島架橋建設課（当時）の八木課長様をはじめ，関係者の皆様にはこの場をお借りして，重ねて感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 田中剛，織田敏彰，鍋島信幸，秋永高史，柳沢晃，河本卓朗：岩城橋の設計 橋梁と基礎 P21～26 2019.9
- 2) 青野祐也，岡本昌也，大村恵治，伊藤拓也，阿部雅弘，新 博之：一般県道岩城弓削線 岩城橋の施工 橋梁と基礎 P7～13 2022.2

第11回国際吊構造橋梁管理者会議を開催しました

The 11th ICSBOC was held in Kobe, Japan

1. 会議の概要

2022年11月14日から16日までの3日間、神戸市の神戸国際会議場において、国際吊構造橋梁管理者協会（以下「ICSBOA」という。）の協力を得て、本州四国連絡高速道路株式会社（以下「本四高速」という。）は、「第11回国際吊構造橋梁管理者会議（以下「本会議」という。）」を主催して、開催しました。会議では、吊橋や斜張橋といった吊構造橋梁の維持管理に携わる180名の技術者（バーチャル参加者を含む）を16か国から迎え、論文発表等を通じて、長大橋の建設・維持管理に関する課題や研究成果の発表及び意見交換を行いました。会議終了後、16日の午後には、明石海峡大橋へのテクニカルツアーを実施し、多くの方々を案内しました。

国際吊構造橋梁管理者会議は、1991年にアメリカで初めて開催されました（ニューヨーク州橋梁公団（以下「NYSBA」という。）が主催）。日本では、第3回会議が淡路（2002年）にて、また、第6回会議が高松（2008年）にて、いずれも本四高速が主催して、それぞれ開催されています。今回の会議は、2008年以來の日本での開催、本四高速主催ということになります。

2. 会議プログラム

11月13日の午後より、会場に隣接するホテルにおいて、会議の受付を開始し、併せて、ウェルカムパーティーを開催し、多くの方にご出席をいただきました。11月14日の朝08:00より、本会議を始めることになりました。今回の会議は、これまで実施した例のない会議参加とオンライン参加を併用したハイブリッド形式による会議とすることが、ICSBOAの議長（Ms. Justine Tietjen）より指摘された事項の一つでした。そこで、主要参加国と思われる国々の地球儀上の分布を考慮し、朝08:00から10:00まで、及び、夕方16:00から18:00までを世界のコアタイムと設定し、論文発表の時間帯とすることになりました。結果として、会議が3日間にわたること、会議室を3部屋用意し、同時並行で進行することとなりました。

今回の会議の概略プログラムを表-1に示します。

「技術セッション」（表-2）については、論文査読の方法や結果の評価、論文発表のプログラム作成などについては、ICSBOAの実行委員の方と協議しながら進めることになりましたが、それ以外のプログラムについては、当社が独自に検討し、実施することになりました。ハイブリッド方式による会議運営も初めてのことでしたが、日本時間のコアタイムである10:00から16:00までの貴重な時間をどのように活用するかも課題と考えました。結果として、会議運営上、初めてのこととなりましたが、長大橋の建設技術と日本のODAにより建設された長大橋の維持管理を対象にしたセッションを設けることにしました。

長大橋建設プロジェクトとして、すでに、建設工事が完了したものもありますが、長大橋として規模の大きな下記5つを選定するとともに、さまざまな立場の方々へに会議への参加、発表の依頼を協議し、いずれも快く了解をいただくことができました。

a. 1915 チャナッカレ橋

建設はBOT事業として実施され、BOT事業者が管理を実施しているが、トルコ国道路庁に発表を依頼。

b. ヤウス・スルタン・セリム橋

BOT事業として実施されていることから、管理を担当しているBOT事業者に発表を依頼。

c. ブレイラ橋

ルーマニア国道路庁が工事発注者であるが、工事実施JVに発表を依頼。

d. ストアストローム橋

デンマーク国道路庁が工事発注者であることから、道路庁に発表を依頼。

e. チャカオ大橋

チリ国道路庁が工事発注者であり、工事発注者でもあり、かつ、事業へのアドバイザーとしても貢献されている大学関係者に発表を依頼。

また、日本のODAによる長大橋管理者への会議参加にあたっては、国際協力機構（以下、「JICA」とする）と連携し、発表の対象とする長大橋と発表者の選定に協力いただきました。その結果、

a. カンボジア国 つばさ橋

b. ラオス国 パクセ橋と第二タイ・ラオス友好橋

c. コンゴ民主共和国 マタディ橋

d. ウガンダ国 ナイル源流橋

表-1 会議プログラム

13日 (日)	18:00~	ウェルカムパーティー
14日 (月)	08:00~10:00	開会式 主催者挨拶 本四高速社長 後藤政郎 協会挨拶 ICSBOA議長 Jastine Tientjen 来賓挨拶 神戸市長 久元喜造 基調講演 城西大学学長 藤野陽三
	10:30~12:30	ワークショップ(長大橋建設プロジェクト関連の論文発表)
	14:00~15:30 16:00~18:30	ワークショップ(長大橋建設プロジェクト関連の論文発表) 技術セッション(論文発表)
15日 (火)	08:00~10:30	技術セッション(論文発表)
	11:00~12:30	ワークショップ(JICAプロジェクト関連の論文発表)
	14:00~15:30 16:00~18:30	ワークショップ(JICAプロジェクト関連の論文発表) 技術セッション(論文発表)
16日 (水)	08:00~10:30	技術セッション(論文発表)
	10:40~11:00 11:30~17:00	閉会式 会議総括 本四高速常務 大江慎一 次期主催者挨拶 NYSBA主任技術者 Jeffrey Wright テクニカルツアー-明石海峡大橋

表-2 技術セッションのテーマ

14日 (月)	16:00-18:30	・吊形式橋梁の点検と維持管理方針 ・塗装管理、舗装設計等 ・ケーブル部材の点検、モニタリング、強度評価
15日 (火)	08:00-10:30	・吊形式橋梁の長寿命化 ・点検、維持管理、更新等の計画 ・ケーブル部材等の維持管理、更新他
	16:00-18:30	・ケーブル送気乾燥システム ・動態観測
16日 (水)	08:00-10:30	・地震、強風、火災 ・地域貢献、経済効果

の5橋を対象として、セッションを構成することができました。

さて、開会式においては、表-1に示すとおり、3名の方にご挨拶をいただきました。後藤政郎本四高速代表取締役社長による主催者挨拶(写真-1)、Justine Tietjen(MTA Bridges and Tunnels, USA)ICSBOA議長はビデオ出演による協会挨拶(写真-2)、久元喜造神戸市長にもビデオ出演により、来賓挨拶をいただきました。その後、本四高速技術委員会委員の藤野陽三城西大学学長により、「日本における長大橋の発展及び本州四国連絡橋の維持



写真-1 開会式 社長挨拶



写真-2 開会式 ICSBOA 議長挨拶



写真-3 開会式 基調講演

管理における実践と課題」をテーマとして、基調講演(写真-3)をしていただきました。

技術セッションでは、最大3つの会議室に分かれて、10セッションの論文発表、その後には活発な討論が行われました。

3.では、発表論文の概要についてご紹介します。ただし、本誌のページ数の制限により、一部の論文のみの紹介となります。

3. 主な発表内容

(1) 長大橋建設プロジェクト：1915 チャナッカレ橋

本発表は、トルコ国 Public Private Partnership 局の Erdoğan DEDEOĞLU 局次長(写真-4)によって行われた。同氏は建設中から現在においても、本橋とオスマンガジ橋の2橋を担当されている。

トルコのチャナッカレ県の欧州側とアジア側を結ぶ1915チャナッカレ橋(写真-5)は、2022年3月18日に開通した。本橋は全長4,608m、中央支間長2,023mを有し、明石海峡大橋を超え、新しい世界一の長大吊橋となった。

橋の設計については、高品質・高維持管理性・高施工性・安全安心等の理念を追求し、100年の長期に利用できる橋を目指した。また、橋の交通荷重、風、地震に対する耐荷性能については、欧米等の設計基準により万全に設計され、カナダ・デンマーク・中国で行われた風洞試験等の性能試験により実証された。

主塔基礎の建設工法は特徴的である。合計368本(欧州側基礎：203本、アジア側基礎：165本)のインクルー



写真-4 1915 チャナッカレ橋の講演 (Erdoğan 氏)



写真-5 1915 チャナッカレ橋

ジョン杭 (Inclusion Piles) により、主塔基礎の設置場所の地盤を補強し、その上に礫層が設けられた。並行して、ドライドック更にウェットドックでケーソンを製作し、4隻の船により設置場所へ浮上曳航、ケーソン内部に海水を注入して沈下させ、礫層の上にケーソンを設置した。

主塔は鋼製の門形であり、2本の塔柱と3段の水平材で構成されている。塔柱は高さ方向に32ブロックに分割され、1ブロックあたりの高さは7~11.5mである。また、主塔は318mの高さを有し、世界で4番目に高い主塔となった。

主ケーブルは片側1本で計2本、1本につき144本のストランドで構成されている。各ストランドは127本のワイヤーで構成され、1本のワイヤーの直径は5.75mmである。架設は、PPWS (プレファブパラレルワイヤストランド) 工法により行われた。一方、ハンガーロープは24mの間隔で配置され、合計314本が使用されている。

床版には、長い中央支間長に対する耐風安定性を考慮し、「TWIN-orthotropic-box deck」と呼ばれる特殊な床版が採用されている。この床版の特徴としては、二つの同じ床版が並行して架設され、24mごとに1本の横桁により接続される形である。架設は、2つの工法が採用された。1つは主ケーブル上に設置されたリフティングガントリーを用いた直下吊り工法、もう1つは大型のクレーン船により吊り上げる工法である。

(2) AI 技術を使用したグレートベルト橋のデータ解析～写真画像を活用した点検システム (PAI) ～

デンマークのフエン島とシェラン島を結ぶグレートベルト橋は、全長 6.6km のウェスト橋と全長 6.8km のイースト橋で構成されている。ウェスト橋は RC 連続箱桁橋で、イースト橋は中央支間長 1,624m を有し、開通時には世界で2番目の長大吊橋であった。

グレートベルト橋の維持管理にあたり、合計で 40 万平方メートルのコンクリート面を点検する必要がある。この膨大な作業量に対し、点検の効率化や高度化のために、橋梁管理者であるストアベルト社 (A/S Storebælt) は、2017年からドローンによる点検の試行を開始した。その結果、ドローンを使用することで従来の点検より作業時間が大幅に減少できたが、大量の画像を確認することが点検員に大きな負担を与えることになった。

そのため、ドローンの点検技術に加えて、AI 技術を使用した「写真画像を活用した点検システム」(以下「PAI」という。)を開発した。最初の PAI の作業フローを図-1 に示す。まず、ドローンにより対象の構造物を撮影し、全ての画像をフォルダに整理する。次に、AI モデルにより、損傷箇所を検出して標記する。そして、点検員は AI の標記結果を確認し、損傷箇所の真偽を判断する。最後に、点検結果の報告書が出力される。PAI を利用することで、簡単にたくさんの写真を処理することができ、点検員の作業時間も減らすことができる。

さらに、損傷検出の精度を高めるために、PAI のアップデートが行われた。PAI のコアである AI モデルについて、3 種類のモデルの対照実験を行い、精度が最も高い AI モデルを採用した。き裂、ひび割れ、剥離等の変状をより正しく検出するために、たくさんの画像による

AI モデルのトレーニングを行った。また、新しい PAI の追加機能については、ドローンが撮影した画像に基づき、構造物の 3D モデル (図-2) を生成し、その後、AI モデルにより解析を行い、異なる損傷を違う色で 3D モデルに標記する。これにより、損傷の全体像を掴むことができる。また、操作の利便性の向上のため、モデルに損傷の理由や説明を追加する機能、過去の点検結果とリンクする機能もある。

新しい PAI を実際の点検に使用した結果により、従来の点検方法では約4か月かかる点検作業が、14日間に短縮できる。

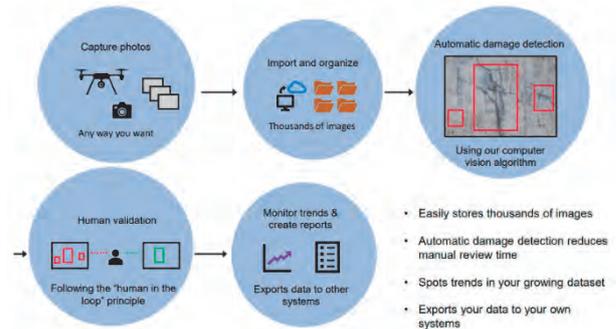


図-1 最初の PAI の作業フロー



図-2 3D モデルのイメージ

(3) ノルマンディー橋とタンカーヴィル橋の動態観測システムのアップグレード

フランスのセヌ川に架橋されているノルマンディー橋とタンカーヴィル橋は、それぞれ 856m の中央支間長を有する長大斜張橋と 608m の中央支間長を有する長大吊橋であり、どちらもフランスの象徴的な橋である。この二つの橋は、建設当初に動態観測システムが導入されたが、老朽化が進行したため、動態観測システムに対するアップグレードが行われた。

まず、既存の動態観測システムの状態を把握するために、センサーシステムに対する点検を行った。その結果、センサーの配置を再検討し、ひずみゲージや超音波風速計等の新型センサーの導入を予定した。また、既存のセンサー、電源、データ収集ユニット等の部品について詳

細点検を行い、各部品の状態に応じて交換または再利用した。

次に、センサーにより収集された大量のデータをよりよく管理するため、当初の独立した4つの動態観測システムのプラットフォームを統合し、全てのデータを1箇所に保存する Smart Asset Management Software（以下「SAMS」という。）プラットフォームを開発した。これにより、違うセンサーからのデータが連携され、数々のデータの相関関係を把握することができるようになった。また、SAMS プラットフォームには、データの可視化、モバイルやタブレット端末の対応、自動レポート生成等の機能を追加することにより、作業の効率性と操作の利便性が向上した。

最後に、データを幅広く利用するため、データ処理のアルゴリズムを実装した。そこで、アルゴリズムがデータを解析することで、様々な課題に対応することができる。例えば、床版の下に設置されたひずみゲージに記録されたひずみデータを解析することにより、床版の疲労寿命を予測することができる。

4. 会議の総括

本会議は、予定通りに進捗し、16日10:40頃から、閉会式を迎えることになりました。今回は、新型コロナウイルス感染症対策を兼ねたハイブリッド形式による開催となりました。10月中旬頃になって、ようやく、新型コロナウイルス感染症に関する水際対策措置が大幅に見直されることになり、参加者の増加が見込まれました。それでも、会議参加者がどの程度になるか、全く予想がつかせんでしたが、表-3、4のとおり16か国から180名の参加者があり盛況のうちに会議を終えることができました。

表-3 会議参加者

	国内	海外	計
会場参加	64	44	108
オンライン参加	20	52	72
計	84	96	180

今回は、オンライン参加者数を含めると、海外からの参加者の方が、国内参加者より多く、ハイブリッド開催のメリットも伺えるような結果となりました。

発表論文数は表-4のとおりです。全論文数は51編でした。そのうち、約1/3は国内の発表が占めました。発表数の多い国としては、米国6編、トルコ国6編、デンマーク国5編でした。トルコ国からは、参加者数も17名に達し、当社と同じく、多くの長大橋を有し、維持管理に関する意識が高いものと思います。今後も、技術的な面での交流が期待されます。図-3は、今回の論文発表において、発表対象となった長大橋の位置図を示します。これまでは、日本・中国、北米、ヨーロッパに偏っていましたが、今回は、東南アジア、アフリカ、トルコにも交流の輪が広がっています。

表-4 参加人数と発表論文数

	参加人数	発表論文数		参加人数	発表論文数
【アジア】			【ヨーロッパ】		
Japan	84	18	Turkey	17	6
China	12	1	Denmark	8	5
Korea	2	1	UK	5	2
Laos	2	1	Sweden	2	3
Canbodia	0	1	Germany	2	0
【北・南米】			France	2	2
USA	34	6	Spain	1	0
Canada	4	1	Norway	1	0
Chili	1	1	Romania	0	1
【アフリカ】			【合計】		
Uganda	3	1	参加人数	180名	16カ国
Congo	0	1	発表論文数	51編	

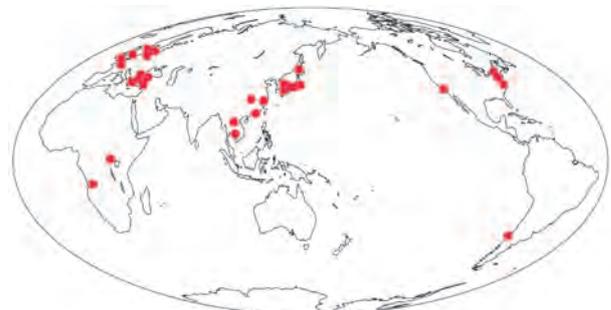


図-3 発表対象となった主な長大橋の分布

16日の閉会式では、大江慎一本四高速取締役常務執行役員より、上記の諸データの紹介に加え、次のとおり、会議総括が講評（写真-6）されました。「吊構造橋梁の運営・維持管理について、様々な情報交換がなされた。今回の会議に参加できなかった吊構造橋梁を管理する国や管理者の方々の参加を期待する。持続可能な開発目標を踏まえた吊構造橋梁の運営・維持管理の取り組みが必要。管理者が抱える課題とその解決策や最新の技術を活用した取り組みなどの様々な情報を共用し、活用していくことを期待する。世界の吊構造橋梁が、より長く、経済的に、その役割を担い、持続可能な世界に貢献していくことを願い、会議の総括とする。」



写真-6 閉会式 会議総括

次回、第12回会議は、2024年に、米国ニューヨーク州にて開催される予定です。閉会式では、次期主催機関となるNYSBAを代表して、Jeffrey Wright主任技術者より、ビデオにて、挨拶と次期会議に向けたメッセージをいただきました。2024年は、NYSBAが管理するベア・マウンテン橋が供用100周年を迎える記念の年になることから、この会議を主催されることを希望されていました。

閉会式の後、参加者全員による記念撮影(写真-7)を行いました。



写真-7 会議終了後の参加者撮影

5. 会議を終えて

閉会式後には、明石海峡大橋へのテクニカルツアーを実施しました。神戸国際会議場を出発し、明石海峡大橋4Aアンカレイジに向かいました。4Aアンカレイジ内にて、明石海峡大橋の施工記録のビデオをグループごとに観ていただきながら、順次、3P塔頂までご案内しました(写真-8)。テクニカルツアーの参加者数は29名でしたが、この日の都合に合わず、別途ツアーを企画したこともあり、合計47名の技術者が明石海峡大橋の壮大なスケールを堪能されました。

ハイブリッド開催という経験のない国際会議の主催でしたが、本社全部・神戸管理センターが協力し、全てのスケジュールをほぼ予定通り完了することができました。



写真-8 テクニカルツアー(明石海峡大橋)

海外の長大橋建設状況

Overseas long-span bridge construction status

伊勢湾口道路、紀淡海峡ルート、豊予海峡ルート等海峡部を結ぶ海峡横断プロジェクトが凍結されて以来、近年、国内での長大橋建設に関する動きがほとんどなくなりました。一方、海外では長大橋の建設が各地で進められ、特に中国では複数の長大吊橋と長大斜張橋の建設が行われています。本稿では、インターネット等で公開されている、長大橋建設プロジェクトに関する技術情報の収集・整理を行った結果の中から、建設中の主要な橋梁のプロジェクトの説明に加え、近年（2020年以降）開通した橋梁についても紹介します。

(1) 吊橋

近年開通済・建設中の長大吊橋のうち、中央支間長が長い代表的な長大吊橋を表-1に示します。

2022年3月にトルコのチャナッカレ県の欧州側とアジア側を接続する1915チャナッカレ橋（写真-1）が開通しました。1915チャナッカレ橋は、開通前まで世界一だった明石海峡大橋を超える、2,023mの中央支間長を有しています。主塔は鋼製の門形であり、2本の塔柱と3段の水平材で構成され、318mの塔は世界で6番目の高さとなります¹⁾。



写真-1 1915チャナッカレ橋（開通後の様子）¹⁾

さらに、それを上回る長大吊橋として、中央支間長2,300mの張靖皋長江大橋（図-1）が中国江蘇省で建設されています。世界最長の中央支間に対応するように、本橋の設計については様々な工夫がされています。例えば、主塔の高さが350mに計画され、引張強度2200Mpaの世界最高強度のケーブルが採用されており、アンカレイジの基礎も110×75×83mと巨大な寸法となっています。2022年6月に建設工事が起工され、現在、海中部分の主塔基礎の建設が実施されています。

燕磯長江大橋は、新しく開港したアジア初の貨物ハブ空港である「花湖空港」と、隣接する高速道路を繋ぐ長大吊橋です。本橋の特徴としては、主ケーブルを4本有し、それぞれのサグ比が異なることです。本橋は2020年に起工されましたが、施工途中に大幅な設計変更（中央支間長が1,860mに変更）が発生したことから、工事が予定より大幅に遅れており、現在は主塔基礎の建設が



図-1 張靖皋長江大橋（橋梁CG図）²⁾

終了した段階です⁴⁾。

中国広東省の深セン市と中山市を結ぶ深中通道を構成する重要な橋である伶仃洋大橋は、1,666mの中央支間長を有する長大吊橋です。橋全体が海上に建設されることから、海中アンカレイジが採用されており、そのうち、東側のアンカレイジは世界最大の海中アンカレイジ（61×83×38m）となります。また、架橋地点が中国の重要な経済圏にあり、大型の船が頻繁に往来するため、桁下高さは90mが確保されています。現在は、主ケーブルの架設が終了しています⁵⁾。

花江峡谷大橋は、中国西南部の経済の活性化を図る「六安高速道路」を構成する重要な橋梁であり、山間部に架橋される長大吊橋です。本橋は1,420mの中央支間長を有し、橋面の標高は海拔625mであり、世界で最も高い場所に位置する長大吊橋となります。現在、主塔の架設が実施されています⁷⁾。

そのほか、中国に南京仙新路過江通道、竜潭長江大橋のプロジェクトが実施されています。南京仙新路過江通道と竜潭長江大橋はそれぞれ1,760mと1,560mの中央支間長を有する長大吊橋です。現在、両橋とも2024年の開通に向けて上部工の工事が実施されています⁸⁾。

表-1 近年開通済・建設中の長大吊橋の中央支間長

順位	橋梁名	国名	中央支間長	開通予定
1	張靖皋長江大橋	中国	2,300m	2027年
2	1915チャナッカレ橋	トルコ	2,023m	2022年（開通済）
4	燕磯長江大橋	中国	1,860m	2025年
5	南京仙新路過江通道	中国	1,760m	2024年
8	深中通道伶仃洋大橋	中国	1,666m	2024年
11	竜潭長江大橋	中国	1,560m	2024年
18	花江峡谷大橋	中国	1,420m	2025年

※ 順位は、供用中の橋梁も含めた中央支間長の順位を示す。

(2) 斜張橋

近年開通済・建設中の長大斜張橋のうち、中央支間長が長い代表的な長大斜張橋を表-2に示します。

2020年7月に中国の滬蘇通長江公鉄大橋が開通しました。本橋は1,092mの中央支間長を有し、道路鉄道併用斜張橋としては、世界最長となります¹⁰⁾。また、2021年に中国湖北省に開通された青山長江大橋と武穴長江大橋は、中央支間長が938mと808mです¹¹⁾。

中国江蘇省に建設中の常泰長江大橋は、斜張橋の様々な世界一を更新します。まず、本橋の中央支間長が世界で最も長い1,176mとなります。ダブルデッキ構造の道路鉄道併用橋として、上層部に高速道路を通し、下層部に一般道路と高速鉄道を通す予定であり、道路鉄道併用斜張橋の中央支間長の記録も更新します。また、塔は4本の塔柱で構成されるダイヤモンド型、塔高が352mで、完成すれば塔高世界一となります。現在は、写真-2に示すように、塔の架設が終了間近になっています¹²⁾¹³⁾。



写真-2 常泰長江大橋（工事現況）¹³⁾

馬鞍山長江公鉄大橋は、中国安徽省の巢湖と馬鞍山を結ぶ都市間道路建設プロジェクトに欠かせないものです。本橋は4径間連続構斜張橋として、2つの主径間が同じく1,120mであり、塔の高さがそれぞれ308m（北側塔）、345m（中央塔）、306m（南側塔）となります。また、本橋もダブルデッキ構造であり、上層部に一般道路を通し、下層部に高速鉄道を通す予定です。現在、塔の架設が実施されています¹⁴⁾。

米国のミシガン州のとカナダのオンタリオ州を結ぶゴードィ・ハウ国際橋は、鋼・コンクリート複合構造であり、853mの中央支間長を有し、米国最長の斜張橋となります。本橋の工期は、当初2018～2024年に予定されていましたが、新型コロナウイルスの感染拡大によって2024年の開通が難しく、2025年まで延伸する予定です。最新の工事状況（写真-3）については、塔の架設と並行し、桁の架設も開始しています¹⁵⁾¹⁶⁾。

そのほか、中国で観音寺長江大橋、百里洲長江大橋、香山大橋のプロジェクトが実施されています。観音寺長江大橋は中央支間長1,160mの長大斜張橋であり、現在、塔基礎の建設が実施されています¹⁷⁾。中央支間長890mの百里洲長江大橋は、2022年3月に起工されて以来、新しい動きがありません。香山大橋は、880mの中央支間長を有し、塔を架設中です¹⁸⁾。



写真-3 ゴードィ・ハウ国際橋（工事現況）¹⁶⁾

表-2 近年開通済・建設中の長大斜張橋の中央支間長

順位	橋梁名	国名	中央支間長	開通予定
1	常泰長江大橋	中国	1,176m	2024年
2	観音寺長江大橋	中国	1,160m	2026年
3	馬鞍山長江公鉄大橋	中国	1,120m	2026年
5	滬蘇通長江公鉄大橋	中国	1,092m	2020年(開通済)
8	青山長江大橋	中国	938m	2021年(開通済)
12	百里洲長江大橋	中国	890m	2026年
13	香山大橋	中国	880m	2024年
15	ゴードィ・ハウ国際橋	米国	853m	2025年
20	武穴長江大橋	中国	808m	2021年(開通済)

※ 順位は、供用中の橋梁も含めた中央支間長の順位を示す。

(3) 斜張吊橋¹⁹⁾

最後に、斜張吊橋という新しい形式の長大橋の情報について紹介します。斜張吊橋は、斜張橋と吊橋を複合した形式で、主ケーブル、ハンガーロープ、斜ケーブルを有し、耐風性と耐震性が優れています¹⁹⁾。現在、この形式の長大橋は、2016年に開通したトルコの第3ボスポラス橋しかありません²⁰⁾。

一方、近年では中国に2件の斜張吊橋の建設プロジェクトの動きがあります。2022年2月に中央支間長1,120mの李埠長江公鉄大橋（図-2）が起工されました²¹⁾。その後、2022年11月に中央支間長1,488mの西垭門公鉄両用大橋が起工されました²²⁾。



図-2 李埠長江公鉄大橋（橋梁CG図）¹⁹⁾

本稿では、近年に開通した長大橋を紹介するとともに、現在建設中の長大橋の状況について概括しました。今後も、海外の長大橋の情報を収集し、整理していきます。

（長大橋・技術部 総括・耐震・耐風グループ
WANG HONGXIN）

参考文献

- 1) 本四高速（株）：第11回国際吊構造橋梁管理者会議開催、長大橋ニューズレター，No.91, 2023.1
- 2) 石小磊：「万里长江架起“世界第一跨”！张靖皋长江大桥全面开工」，揚子晚報，2022.06.28
<https://www.yangtse.com/content/1480140.html>
- 3) CGTN Japanese/AFPBB News：「世界最高のつり橋主塔 基礎工事完了」，フランス通信社，2022.10.26
<https://www.afpbb.com/articles/-/3430704>
- 4) 熊琦，羅航，李冰清：「湖北燕矶长江大桥南岸主墩桩基完工」，新華社，2022.09.07
<https://m.gmw.cn/baijia/2022-09/17/1303144513.html>
- 5) Daichi：「深センと珠海／中山をつなぐ「深中通道」「深珠通道」は未来の橋！」，Shenzhen Fan，2020.05.08
<https://www.shenzhen-fan.com/2020-05-08-shenzhen-zhongshan-zhuhai-bridge/>
- 6) 張政，李冕：「深中通道伶仃洋大桥主缆完成架设」，央視網，2022.09.23
<http://photo.cctv.com/2022/09/23/PHOAb6Rg4bzQgObjaKMqHgF7220923.shtml>
- 7) 郭紅宇：「向纪录迈进 花江峡谷大桥主塔突破百米」，多彩貴州網，2022.08.26
<http://www.gog.cn/gzdt/system/2022/08/26/018212261.shtml>
- 8) 邱才華：「1760米，南北主塔“一线牵”！南京仙新路过江通道先导索成功过江」，揚子晚報，2022.09.29
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1745280272480731924&wfr=spider&for=pc>
- 9) 陈晨：「龙潭长江大桥突破性进展！」，新浪新聞，2022.10.30
http://k.sina.com.cn/article_1750349220_685435a4019011f2d.html
- 10) 本四高速（株）：滬蘇通長江公鉄大橋開通，長大橋ニューズレター，No.82, 2020.10
- 11) 戴輝：「交通建设显现硬实力 湖北8个月通车6座长江大桥」，湖北日報，2021.12.31
https://view.inews.qq.com/k/20211231A01R1B00?web_channel=wap&openApp=false
- 12) 隋業輝，陳嘉倫：「常泰长江大桥，“未来建造”助力实现六项世界之最」，長江日報，2022.10.13
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1746549324231511573&wfr=spider&for=pc>
- 13) 蔡艷：「最新进展+重大节点！事关常泰长江大桥」，騰訊網，2022.11.07
<https://new.qq.com/rain/a/20221107A03IWO00>
- 14) 馬榮瑞：「这座大桥，主塔施工高度突破百米」，光明日報，2022.11.07
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1748852742943509980&wfr=spider&for=pc>
- 15) Robin Runyan：「Gordie Howe International Bridge construction officially starts」，Curbed Detroit，2018.10.05
<https://detroit.curbed.com/2018/10/5/17940636/gordie-howe-international-bridge-construction-officially-starts>
- 16) Dave Battagello：「Gordie Howe bridge project struggling to finish on time」，Windsor Star，2022.08.05
<https://windsorstar.com/news/local-news/gordie-howe-bridge-project-struggling-to-be-completed-on-time>
- 17) 李桂香：「这座世界级品牌桥梁工程建设取得新进展！观音寺长江大桥主墩首桩开钻」，湖南日報，2022.09.29
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1748852742943509980&wfr=spider&for=pc>
- 18) 楊啓寧，梁鑫：「东部外环高速香山大桥进入底基层施工」，中山之窓，2022.05.06
http://www.zsbtv.com.cn/a/bdxw/content_181085.shtml
- 19) 藤井美久，勝地弘，山田均，西尾真由子：超長大斜張吊橋の構造・耐風特性の解析，第23回風工学シンポジウム論文集，pp.313，2014
- 20) 本四高速（株）：第3ボスプラス橋開通，長大橋ニューズレター，No.67, 2017.1
- 21) 龔萍：「今日正式开建！湖北再添一座长江大桥」，長江日報，2022.02.28
<http://hb.ifeng.com/c/8DvApf0KF39>
- 22) 張翀：「甬舟铁路西堠门公铁两用大桥正式开工」，工人日報，2022.11.03
<https://baijiahao.baidu.com/s?id=1748479951071250915&wfr=spider&for=pc>

2021年度塗装工学編集委員長賞受賞

2021 Journal of Japan Coating Technology Association Editor-in-Chief Award

2022年5月27日の日本塗装技術協会2022年度通常総会において、「本州四国連絡橋における塗装の維持管理と塗料の開発」（執筆者：竹口昌弘（鳴門管理センター所長：執筆時 長大橋技術センター防食・耐風グループリーダー）、大谷康史（しまなみ尾道管理センター副所長：執筆時 東京事務所 技術調整課長））が2021年度塗装工学編集委員長賞を受賞しました。

一般社団法人日本塗装技術協会は、「塗装・塗料に関する学術的、技術的、生産的、教育的事項について調査・研究を行い、もって塗装技術の進歩普及を図り、地球環境との調和による産業の発展と生活の向上に寄与することを目的とする。（協会定款より引用）」としており、塗料メーカー、自動車メーカーなどが会員となっています。

塗装工学は、日本塗装技術協会の協会誌で現在毎月発刊されています。本稿は、関東における当社の講演に参加された協会関係者からの情報を元に、編集事務局より執筆依頼があり、それに応じたものです。

論文内容は、執筆依頼内容に基づき、協会の目的を踏まえ、本州四国連絡橋における塗装の維持管理と執筆当時開発が完了していた省工程型塗料を含めた塗料の開発内容を2本柱として取りまとめました。

受賞は、本四高速が取り組んできた、これまでの塗装の維持管理手法、維持管理で得た情報のフィードバックにより成し遂げた塗料の開発が、評価されたものと受け取っています。

受賞に関する情報は、日本塗装技術協会のホームページ内、<http://jcot.or.jp/yususyo.html>に掲載されています。

塗装技術は、当社が扱う技術の中でも適用範囲が広い技術であり、このたびの受賞は幅広い分野の方に当社の技術を知っていただく、長大橋技術の発信の良い機会になったと考えています。

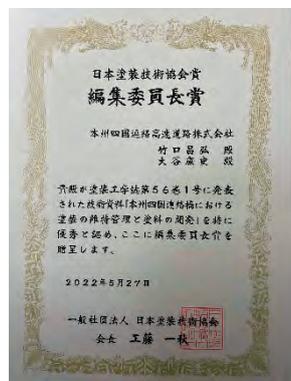


写真-1 表彰状

（しまなみ尾道管理センター 副所長 大谷康史）



写真-2 受賞の盾

国土技術研究会自由課題最優秀賞受賞

HSBE member won the best award in MLIT Technical Conference

2022年11月10日（木）～11日（金）に国土交通省にて開催された「令和4年度 国土交通省 国土技術研究会」において、当社代表として自由課題／一般部門（安心・安全I）で発表した「垂水ジャンクション交通事故多発地点における事故対策に関する一考察（神戸管理センター 計画グループ 藤井彩佳）」が、最優秀賞を受賞しました。

本研究会は、内務省直轄技術研究会として昭和22年に初開催された後、毎年開催され今年で76回目の開催を迎えました。発表課題は、指定課題と自由課題に区分され、更に自由課題は、一般（安全・安心）、一般（活力）、イノベーション、アカウントビリティの各部門が設けられ、本省、地方整備局、高速道路会社、試験研究機関等から発表がありました。

本四高速では、毎年、社内の技術発表会の優秀論文から代表論文1編を選考応募しています。今回応募した一般部門（安全・安心）では、総数23編の発表があり、論文、プレゼンテーションなど総合評価の結果、最優秀賞2編、優秀賞4編が表彰されました。



写真-1 藤井彩佳氏＝中列右から5人目

受賞した本編は、神戸淡路鳴門自動車道・垂水ジャンクションのCランプで多発する事故について過去10年間の事故調書から事故傾向等の把握を行い、これまで実施されてきた対策とその効果について取りまとめたものです。

（長大橋・技術部 総括・耐震・耐風グループ 金田泰明）

文 献 紹 介

本州四国連絡橋関連技術文献紹介 (22.05~22.11)

題 名	著 者	雑誌名等	巻 号	年 月	頁
四国島民四百万人の悲願であった瀬戸大橋の建設 ～本州と四国を初めて陸続きに～	加島聡 大塚岩男 平野茂 金崎智樹	インフラ整備70年講 演会		202104	8
地域間産業連関表による本四高速道路の経済効果 分析	片山雄也 小山智	令和3年度近畿地方 整備局研究発表会		202106	5
PIARC TC 4.2「橋梁」調査中間報告	今井清裕 白戸真大 鎌田将 史 佐藤陽一 遠藤和男	道路 2021.12		202112	2
S字型ラッピングワイヤを用いた吊橋主ケーブル 送気乾燥システムの防食高架	薄井稔弘 大西諒 馬詰大地	高速道路と自動車 第65巻 第3号	65 3	202203	4
長大橋維持管理における技術開発	杉山剛史	道路 2022.04		202204	4
JB本四高速グループの行動計画2022-2024策定	本州四国連絡高速道路(株) 経営計画部	高速道路と自動車 第65巻 第5号	65 5	202205	4
吊橋主ケーブル上段ハンドロープの張力再導入ー しまなみ海道(西瀬戸自動車道)因島大橋ー	下瀬恒大 本郷誠人 石井一 知	高速道路と自動車 第65巻 第6号	65 6	202206	4
本州四国連絡高速道路株式会社 ー令和4年度高速道路事業計画の概要ー	本州四国連絡高速道路(株) 経理部 経営計画部 企画部	高速道路と自動車 第65巻 第6号	65 6	202206	4
強アルカリ水供給下および高温環境下における表 面被覆材の付着特性の検討	Sengchiv CHEA 森川英典 西 川諒 中西智美 平松直人	土木学会関西支部 年次学術講演会		202208	3
アクティブブロックイン赤外線計測に基づく防食塗 装の残存膜厚の定量評価	坂田巧 森本龍人 小川裕樹 阪上隆英 塩澤大輝 有馬敬 育 内野隆太郎 西谷雅弘	日本機械学会 MRM2022 材料力学カ ンファレンス		202209	6
多々羅大橋耐震補強における国内最大規格の制震 ダンパー性能試験	下瀬恒大 金田崇男 姫野岳 彦 大口真司	土木学会全国大会 第77回年次学術講演 会		202209	3
長大橋りょうの地震時被害即時推定手法の開発	月岡桂吾 坂井公俊 豊岡亮 洋 金田崇男 西谷雅弘 角 野拓真 菊地佳誉	土木学会全国大会 第77回年次学術講演 会		202209	3
海峡部橋梁路面上の強風特性調査	遠山直樹 大西康之 勝地弘	土木学会全国大会 第77回年次学術講演 会		202209	3
長大橋における塗替え後塗膜の劣化予測	平松直人 山根彰 大賀弘貴	土木学会全国大会 第77回年次学術講演 会		202209	2
鋼橋塗替塗装における水系塗膜剥離剤の施工報告	溝上善昭 中山義雄 大隅俊 陽 久禮善生	土木学会全国大会 第77回年次学術講演 会		202209	3

※本四技報，技術発表会は除外。

本四技報編集委員会・幹事会名簿(五十音順)令和4年9月1日現在

委員長	福永	勸	幹事長	西谷雅弘
委員	朝倉義博	池田秀繼	幹事	大倉章弘
	河藤千尋	岡本浩幸		門田整達
	杉山剛史	北村岳伸		中野正樹
	土谷政治	河野敏博		高田中輝
	花井城忠典	田遠山直樹		藤城田憲二
	宮口和博	藤三橋直樹		向原上正俊
	村上山基彰	森山		森吉丸直明
				吉吉本和美

本四技報 第139号

発行 令和5年1月31日
編集・発行 本州四国連絡高速道路株式会社
印刷 有限会社 セキグチ

本州四国連絡高速道路株式会社
Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited
〒651-0088 神戸市中央区小野柄通4-1-22
アーバンエース三宮ビル内
電話番号：078(291)1000(代表)
<https://www.jb-honshi.co.jp>



