

本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.50 No.144 2025.12

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144号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.144

【巻頭言】

本四高速グループの技術力：未来への挑戦……………楠原栄樹… 1
Engineering Excellence and Future Vision of the Honshu-Shikoku Expressway Group

【技術論文】

来島海峡大橋の耐震性能照査・設計……………坂本佳也・貴志友基… 2
Seismic performance verification and seismic design of Kurushima-Kaikyo Bridges

門崎高架橋の作業車レールが耐風性に与える影響……………小見山 翔・貴志友基・坂本佳也…10
Influence of the maintenance gantry rails on the aerodynamic stability of the Tozaki Viaduct

瀬戸大橋の塗替え塗装工事の現況……………波多野文人・北村岳伸…16
Current progress of the repainting work on the Seto-Ohashi Bridge

近赤外線ハイパースペクトル計測による塗膜評価の実橋試験……………馬谷連太郎・田村拓登・河野晴彦…22
Field testing of coating evaluation on actual bridges using near-infrared hyperspectral measurement

スマートフォンによるケーブル張力測定システム（テンションリーダー）の開発……………朝見之哉・二宮仁司・伊藤進一郎…29
Development of 'Tension Reader': smartphone-based system for cable tension measurement

IoT デバイスを活用したケーブル送気乾燥監視システムの開発……………外 和也・米澤篤志・溝上善昭…35
Development of cable dry air injection monitoring system utilizing IoT devices

主ケーブル外装モニタリングシステムの開発……………大淵慶大・永島源土・大浦義司…41
Development of main cable exterior monitoring system

ETC2.0 を用いた渋滞情報提供の精度向上に関する取組……………入江桃子・亀谷貴之…47
Initiatives to improve the accuracy of traffic congestion information using ETC2.0

センシング技術を活用した橋梁点検補修作業車の安全性能高度化への取組……………西山貴偉・河野正樹・松葉真人…53
Initiatives for enhancing the safety performance of maintenance vehicles for bridge inspection and repair using sensing technologies

ワイヤーロープ潤滑油の自動塗布装置の考案……………吉岡将庸・原口大樹・松葉真人…59
Invention of automatic lubricant application device for wire rope

【高速道路事業高度化年次報告】

保全業務高度化部会の取組……………寺嶋賢策…65
Report of subcommittee for maintenance

防災・安全業務高度化部会の取組……………簗戸喜一・松尾俊宏…67
Report of subcommittee for disaster prevention and safety

交通運用高度化部会の取組……………四木誠二…68
Report of subcommittee for traffic control

ETC・サービス業務高度化部会の取組……………萬城基樹…69
Report of subcommittee for ETC and service

【技術ニュース】

IRF グローバルロード会議……………堀川 俊…70
IRF Global Road Conference

道路災害マネジメントに関する国際ワークショップ（大阪）……………下瀬恒大…70
International Workshop on Road Disaster Management (Osaka)

PIARC TC4.2 橋梁委員会……………坂本佳也…71
PIARC TC4.2 Bridges

北欧の長大橋管理者との技術交流会……………小林弘昌…72
Technical Exchange with Long-span Bridge Operators in Northern Europe

第12回ニューヨーク市橋梁会議……………WANG HONGXIN…73
12th NEW YORK CITY BRIDGE CONFERENCE

【保有特許】

保有特許一覧……………74
List of patents

【文献紹介】

本州四国連絡橋関連技術文献紹介……………76
Technical articles related to Honshu-Shikoku Bridges

来島海峡大橋の耐震性能照査・設計

Seismic performance verification and seismic design of Kurushima-Kaikyo Bridges



写真-1 来島海峡大橋

Photo 1 Kurushima Kaikyo Bridges



写真-2 センターステイケーブル（上）とサイドステイケーブル（下）

Photo 2 Center stay cables (above) and Side stay cables (below)

門崎高架橋の作業車レールが耐風性に与える影響

Influence of the maintenance gantry rails on the aerodynamic stability of the Tozaki Viaduct

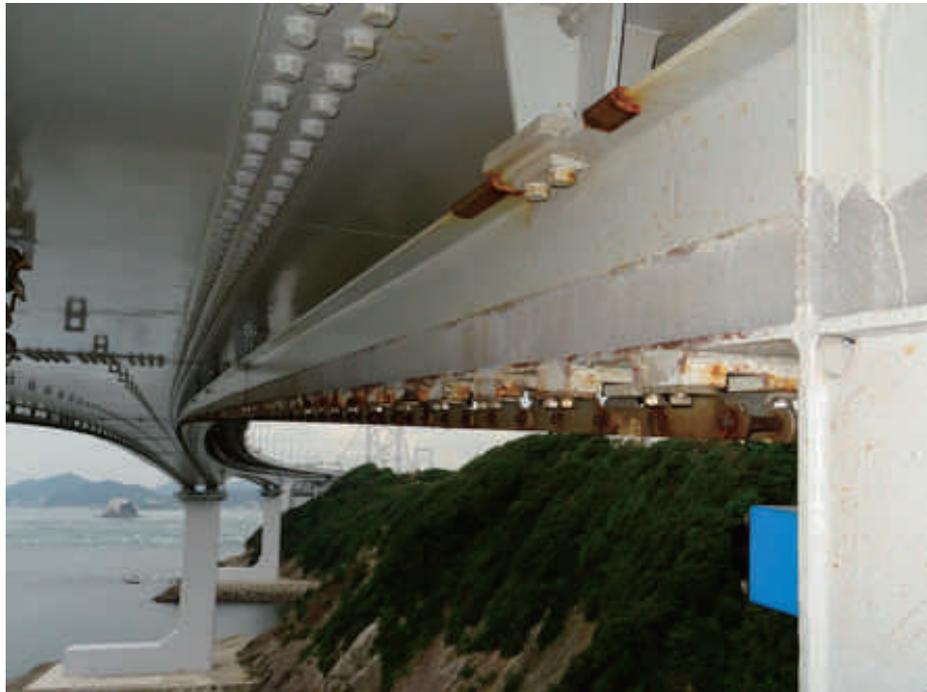


写真-3 作業車レール鋼材腐食状況

Photo 3 Steel corrosion of the maintenance gantry rails

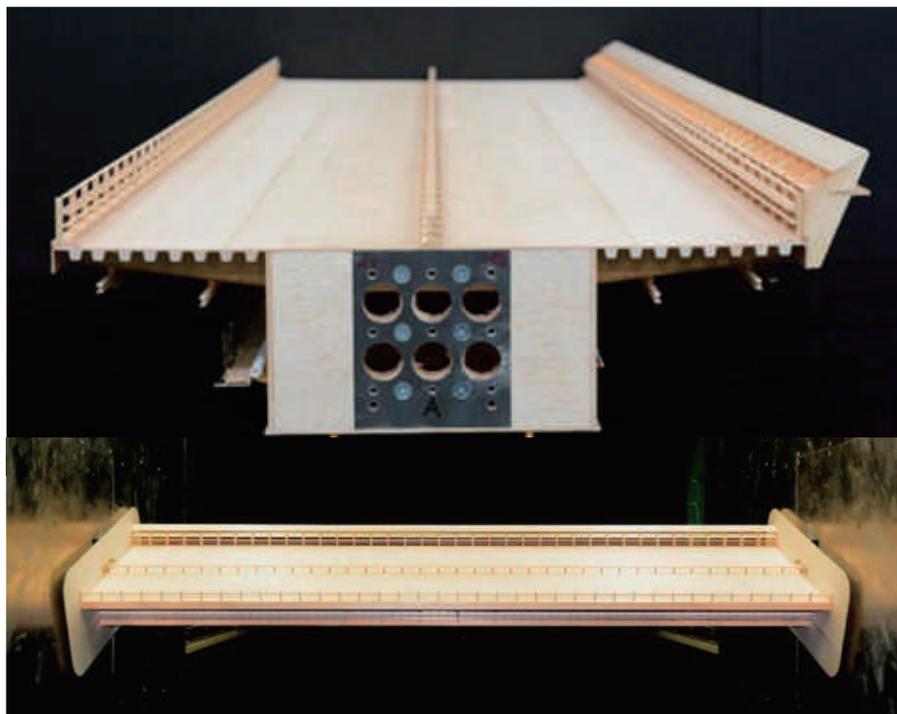


写真-4 門崎高架橋 3 径間部風洞模型と風洞試験状況

Photo 4 Model and Wind tunnel test setup of three-span section

瀬戸大橋の塗替え塗装工事の現況

Current Progress of the Repainting Work on the Seto-Ohashi Bridge



写真-5 瀬戸大橋の概要

Photo 5 Panoramic view of Seto-Ohashi Bridge



写真-6 荷下ろし用ステージ

Photo 6 Spacious scaffolding for carrying in materials

近赤外線ハイパースペクトル計測による 塗膜評価の実橋試験

Field Testing of Coating Evaluation on Actual Bridges using Near-Infrared Hyperspectral Measurement



写真-7 北備讃瀬戸大橋における定点位置での実橋試験

Photo 7 Field test at a fixed point on the Kita Bisan-Seto Bridge

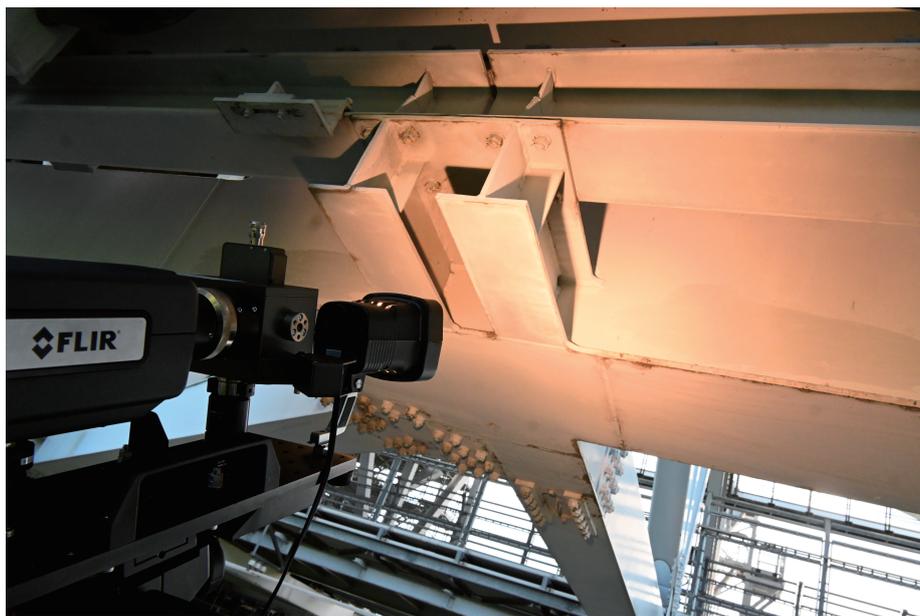


写真-8 因島大橋における桁外面作業車を用いた実橋試験

Photo 8 Field test using a maintenance vehicle for outside girder on the Innoshima Bridge

スマートフォンによるケーブル張力測定システム (テンションリーダー)の開発

Development of 'Tension Reader': A Smartphone-Based System for Cable Tension Measurement



写真-9 スマートフォンによる計測状況 (大島大橋)

Photo 9 Frequency measurement using smartphone (Ohshima Br.)



写真-10 スマートフォンによる計測状況 (岩黒島橋)

Photo 10 Frequency measurement using smartphone (Iwakurojima Br.)

IoTデバイスを活用した ケーブル送気乾燥監視システムの開発

Development of Cable Dry Air Injection Monitoring System Utilizing IoT Devices



写真-11 新たに開発したケーブル送気監視システムの実橋試験
Photo 11 Field test of the new dry-air injection monitoring system



写真-12 無線通信機器の設置状況（大島大橋）
Photo 12 Installation of wireless communication device (Ohshima Bridge)

主ケーブル外装モニタリングシステムの開発

Development of Main Cable Exterior Monitoring System



写真-13 来島海峡第三大橋における実橋試験

Photo 13 Field test on the Third Kurushima Kaikyo Bridge

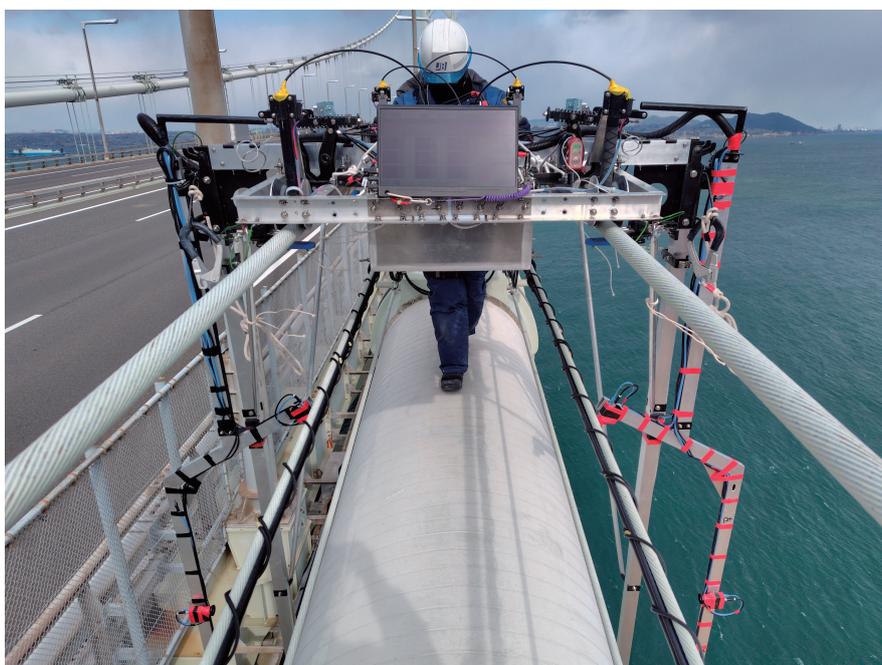


写真-14 明石海峡大橋における実橋試験

Photo 14 Field test on the Akashi Kaikyo Bridge

ETC2.0を用いた渋滞情報提供の 精度向上に関する取組

Initiatives to Improve the Accuracy of Traffic Congestion Information Using ETC2.0



写真-15 ITS スポット

Photo 15 ITS spot



カーナビ表示例

ITSスポット全景

写真-16 ITS スポットによる情報提供イメージ

Photo 16 Image of information provision by ITS spot

センシング技術を活用した橋梁点検補修用作業車の 安全性能高度化への取組

Initiatives for Enhancing the Safety Performance of Maintenance Vehicles for Bridge Inspection and Repair
Using Sensing Technologies

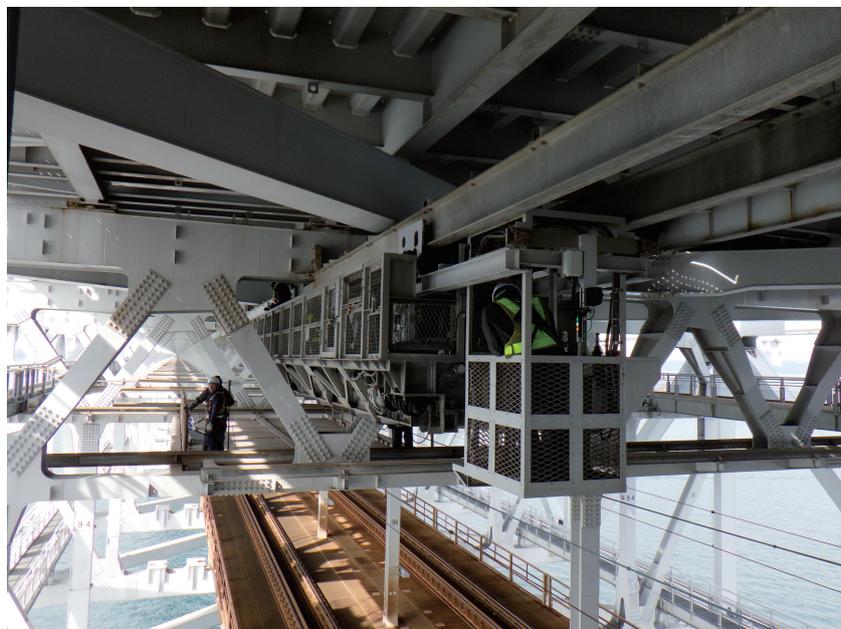


写真-17 桁内面作業車

Photo 17 Inside girder maintenance vehicle

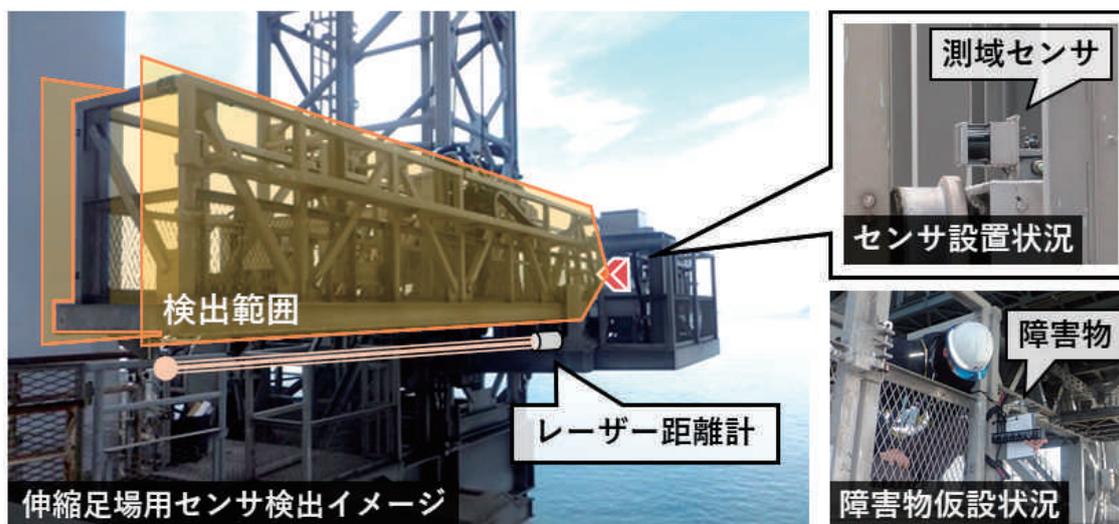


写真-18 桁外面作業車の実橋試験状況

Photo 18 Field test status of outside girder maintenance vehicle

ワイヤーロープ潤滑油の自動塗布装置の考案

Invention of Automatic Lubricant Application Device for Wire Rope

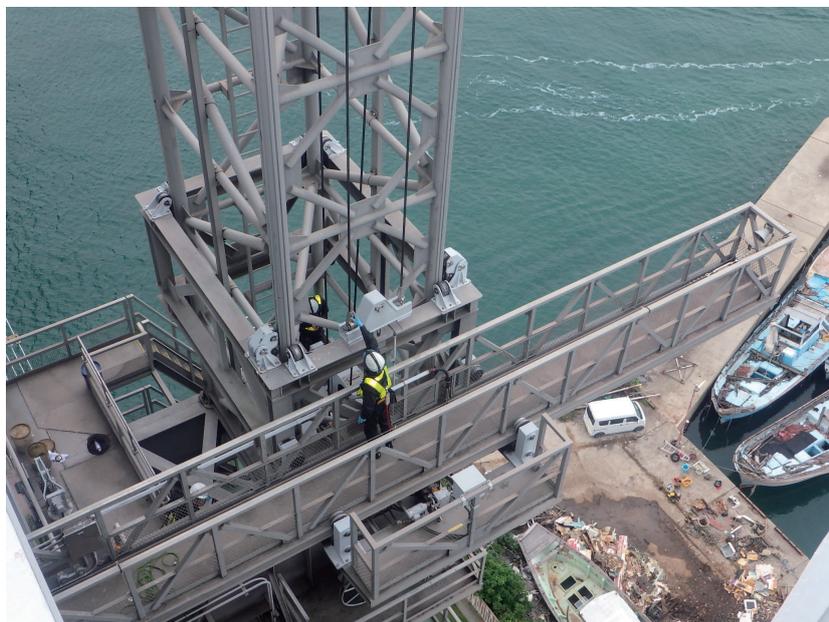


写真-19 桁外面作業車の伸縮足場

Photo 19 Telescopic scaffolding of maintenance vehicles for outside girder

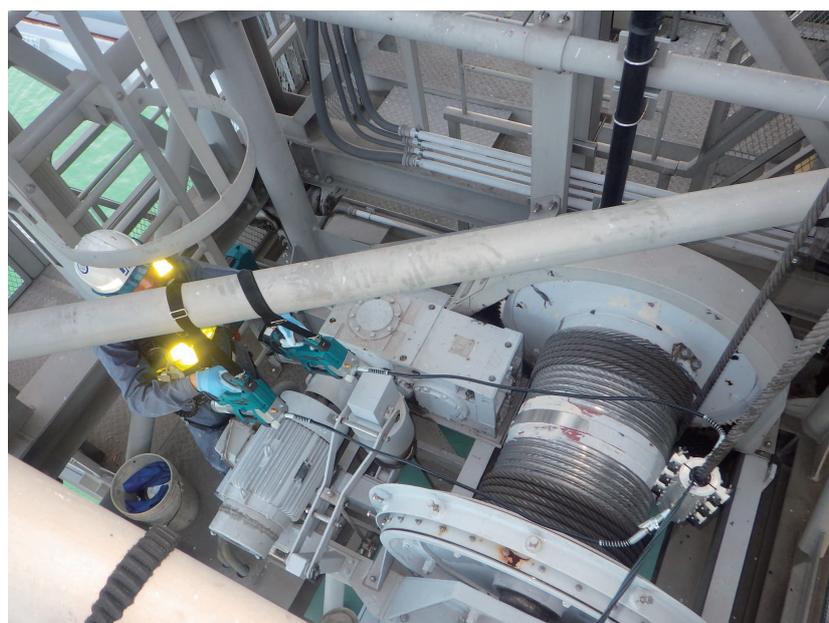


写真-20 実橋試験状況

Photo 20 Field test status on bridges

本四高速グループの技術力：未来への挑戦

Engineering Excellence and Future Vision of the Honshu-Shikoku Expressway Group

執行役員 経営計画部長 楠原 栄樹
Shigeki Kusuhara

1. はじめに

2025年3月に策定された「JB本四高速グループビジョン2035（以下、「GV2035」という）は、目標達成に向け歩みを始めたばかりです。GV2035の詳細についてはすでに様々な媒体で紹介されているため、今回はその根幹をなす「本四高速グループの技術力」に焦点を当てて述べます。

2. JB本四高速グループビジョン2035の概要

2025年3月に策定された「GV2035」は、10年後に「つなぐ力」をもって広く社会に貢献する企業グループを目指すため、未来を見据え、夢を実現し、決して諦めない「本四DNA」を大切に、本四高速グループ（以下、「本四G」という）が一丸となって、次の4つの道のりを掲げ、社会貢献を目指しています。

- ① 安全・安心・快適を追求し本四間の移動を支えます
- ② 瀬戸内地域の発展と橋梁技術の課題解決に貢献します
- ③ サステナビリティ経営を深めます
- ④ 魅力と誇りに満ちた企業グループに成長します

加えて、GV2035の実現に向け、今後3年間で重点的に取り組む施策をまとめた「中期経営計画2025-2027」も策定しました。これらの詳細は、ホームページで公表されています。（https://www.jb-honshi.co.jp/corp_index/company/plan/）

3. 本四高速グループの技術力

前述の4つの道のりを掲げ、社会貢献を目指すためには、本四Gの技術力が重要な鍵となります。では、私たちが持つ技術力とはどのようなもののでしょうか。

本四Gは、世界で唯一、17の長大橋の建設から維持管理までを一貫して担う組織です。建設から25年以上が経過し、諸外国ではその後も最新技術を適用した橋が建設されているため、これを強みではないととらえる向きもあるかもしれません。

一方で、世界有数の地震国であり、台風の常襲地域でもある日本では、他国では考慮しない設計・施工条件を前提にする必要があります。加えて、維持管理に配慮した構造の工夫など、設計などには表現しきれない現場の知見も多く、他者が本四Gの技術に追従できない領域も存在します。さらに、17の長大橋に対して世界に先駆けて予防保全を適用した25年以上の維持管理経験も、他の

追従を許さない本四Gの大きな強みです。

これらの建設・維持管理の経験をもってしても本四Gだけでは解決できない課題も多く存在します。その際は、学識経験者（学）、行政機関（官）、設計施工業者（民）といった様々な分野の専門家と本四Gの社員が深い信頼関係のもと、協働して課題を解決しています。このように多様な専門分野に対応できる人材を擁している点も、本四Gの顕著な強みです。私たちは、この技術力を活かし、安全・安心・快適な本州・四国間の移動を支え続けます。

4. 長大橋技術支援人材の育成

私が技術者としての技術力習得を志した原点は、公団時代の理事協議にさかのぼります。長大橋の設計基本条件は、知識と経験が豊富な理事の承認が必要でした。ある協議に同席した際、上司の新たな技術提案に対し、理事が「君がやりたいのなら、やってみたら良い」と発言されたのです。これは、理事が上司の技術力を高く評価し信頼していたからこそその言葉であり、当時20代だった私は、信頼して任せてもらえるような技術者になりたいと強く思いました。その後、技術力向上に努め、技術士資格や学位を取得することで、長大橋の耐風設計に精通する技術者として評価を得るに至りました。

長大橋は、耐震、耐風、疲労、防食など多岐にわたる技術分野から成り立っています。本四Gには各分野に精通した複数の技術者が在籍しており、彼らがチームを組んで国内外の他機関への技術支援を行っています。

GV2035では、国内外の橋梁が抱える技術的課題の解決を目標に掲げています。その実現のため、当面の目標として、2027年までに長大橋技術支援人材を32名確保する計画です。この目標を達成するためには、技術力向上を目指す若手技術者と、経験豊富な技術者がペアで技術支援を担当するなど、技術の継承を積極的に行っていく必要があります。

5. おわりに

今後も本四Gは、GV2035を実現に向けて、本州と四国を安全・安心・快適に結ぶ重要な役割を果たし、瀬戸内地域の発展に貢献してまいります。また、橋梁技術のフロントランナーとして、カーボンニュートラルを見据えた技術開発を推進し、国内外の橋梁技術に関する課題を解決に貢献してまいります。

来島海峡大橋の耐震性能照査・設計

Seismic performance verification and seismic design of Kurushima-Kaikyo Bridges

坂本 佳也

Yoshiya Sakamoto

長大橋技術部 技術総括課長代理

貴志 友基

Yuki Kishi

長大橋技術部 技術総括担当部長

概要

来島海峡大橋は、想定される大規模地震時に補剛桁の橋軸方向の変位に起因する損傷が生じることが確認された。この損傷に対し、橋軸方向の補剛桁の変位の抑制を行ったうえで、必要な補強を実施することとした。橋軸方向の補剛桁の変位抑制策として、主塔と補剛桁間への粘性型制震ダンパーの設置が一般的であるものの、吊橋の耐荷性能への影響や維持管理性の不安などの課題がある。そこで、主ケーブルと補剛桁の相対変位の抑制を意図したステイ構造に着目し、既存のステイ構造を摩擦型制震ダンパーに置換する対策を採用することとした。本稿は来島海峡大橋の耐震性能照査及び補強設計について報告するものである。

The damage caused by the displacement of the stiffening girders in the longitudinal direction may occur due to a large-scale earthquake by the result of seismic performance verification for Kurushima-Kaikyo Bridges. For this damage, it decided to limit the displacement of the stiffening girders in the longitudinal direction and then carry out the necessary countermeasure. As the countermeasure, the installation of viscous dampers between the main towers and the stiffening girders is generally common. However, this countermeasure has issues about its affect on the load-bearing capacity of the suspension bridge and maintenance for viscous damper. Therefore, we focused on the stay structure, which is designed to limit relative displacement between the main cables and the stiffening girders, and adopted a countermeasure involving the replacement of the existing stay structure with friction dampers. This paper reports on the seismic performance review and reinforcement design of the Kurushima-Kaikyo Bridge.

1. はじめに

来島海峡大橋は今後30年間に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率が26%未満の地域にある吊橋である。来島海峡大橋を含む海峡部橋梁は、道路橋示方書（以下、「道示」という。）の適用支間長200mを超える橋梁であったことから、建設時には当時の知見を基に設定された架橋地点の地震動により耐震設計が行われていた。その後、兵庫県南部地震などの経験を踏まえ、最新の知見による内陸直下型地震の影響の見直しや、近い将来の発生が予測される東南海・南海地震に対し、海峡部橋梁の耐震補強を順次進めてきた。海峡部橋梁の耐震補強は、神戸淡路鳴門自動車道から開始し、その後、瀬戸中央自動車道、西瀬戸自動車道の順に進めてきており、来島海峡大橋が最後となる。本稿では、来島海峡大橋の現況の耐震性能照査と照査結果を踏まえた補強設計について吊橋構造部を主として報告する。

2. 橋梁概要

来島海峡大橋は1999年に供用を開始した西瀬戸自動車道の四国と大島を結ぶ3連の補剛箱桁吊橋である。橋梁概要を表-1に、一般図を図-1に示す。

来島海峡大橋は、来島海峡第一大橋（以下、「第一大橋」という。）が側径間及び中央径間の補剛桁をハンガーで吊り下げている一般的な3径間2ヒンジ吊橋であるのに対し、来島海峡第二大橋（以下、「第二大橋」という。）は四国側の側径間、来島海峡第三大橋（以下、「第三大橋」という。）は側径間が高架橋となっている。

建設時の耐震設計では、架橋地点で起こり得る地震動として、架橋地点に影響することが予想される大規模地震として土佐沖で発生が予想される地震M8.5)及び日向灘で発生が予想される地震(M8.0)に加え、架橋地点を中心とする半径300kmの範囲内で起こるM6.0以上の地震が考慮されている¹⁾。

表-1 橋梁概要

Table.1 Outline of Kurushima-Kaikyo Bridge

橋梁名	来島海峡第一大橋	来島海峡第二大橋	来島海峡第三大橋
形式	3径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋	2径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋	単径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋
橋長 (支間割)	960m (140+600+170m)	1,515m (250+1,020m)	1,570m (1,030m)
幅員	27m		
床版形式	鋼床版(車道部12mm、原自歩道10mm)		
平面線形	直線		
縦断勾配	1.8%放物線勾配		
横断勾配	2.0%直線勾配		
適用耐震基準	明石海峡大橋上部構造耐震設計要領(案)(本四公団、H1)、来島大橋剛体基礎耐震計算法(案)(本四公団、H2)等		

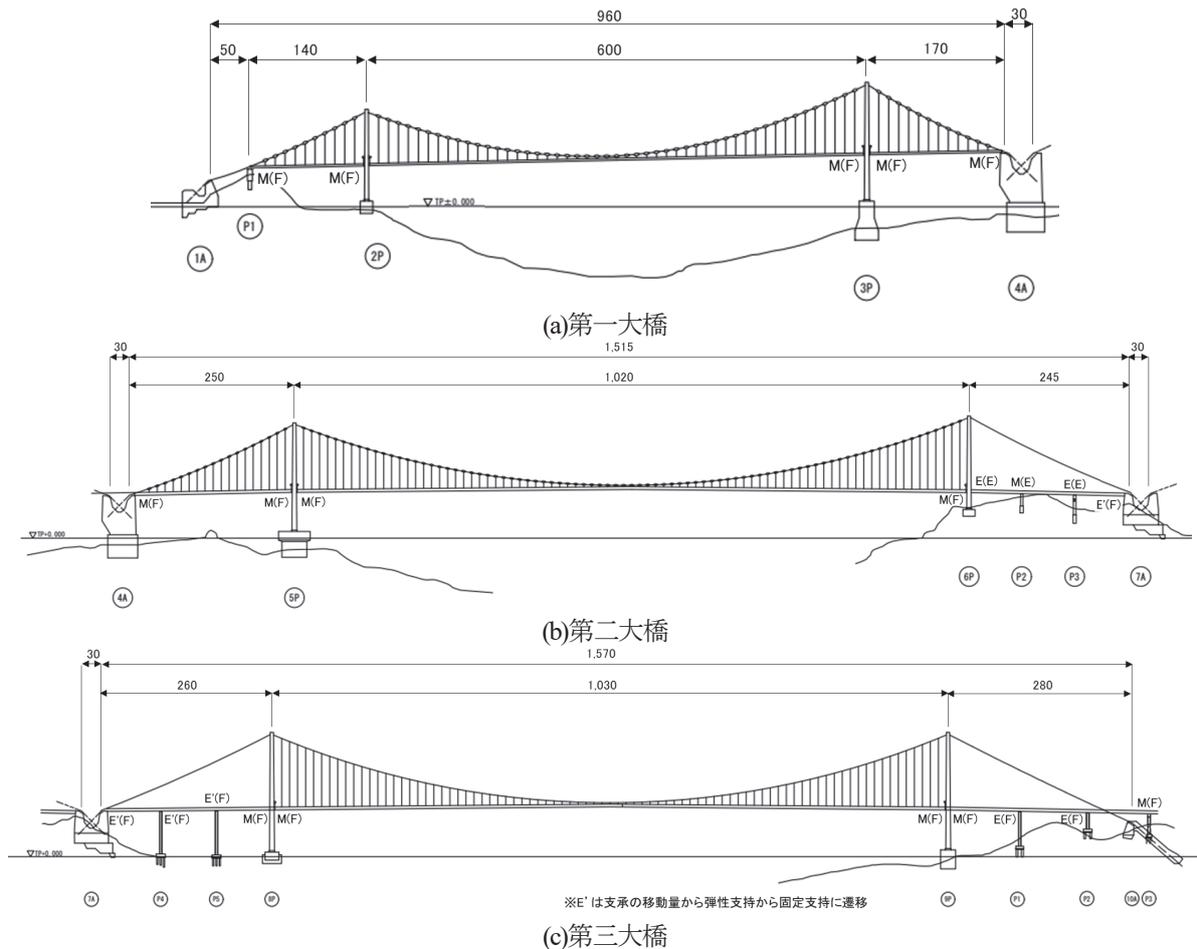


図-1 橋梁一般図

Fig.1 General view of Kurushima-Kaikyo Bridge

3. 動的解析

3.1 入力地震動

来島海峡大橋の耐震性能照査・設計で用いる地震動は、来島海峡大橋の架橋地点の地盤構造、近隣の断層などを考慮した断層モデルから求め、第二大橋6Pの工学的基盤面(せん断弾性波速度(以下、「Vs」という。)=1,000m/s)で定義したものである。

地震動は、タイプ I 地震動として東南海・南海地震(M_w8.6) 1 波、タイプ II 地震動として想定芸予地震(M_w7.3) 2 波及び地表に現れていない断層である伏在

断層による地震(架橋地点直近で M_j6.8 相当を想定) 2 波の計 5 波を考慮した。このほか、タイプ II 地震動として中央構造線(石鎚-伊予灘断層)による地震(M_w7.5)も想定されるものの、架橋位置との関係から、想定芸予地震に比べて地震の影響は小さいことから、考慮しないものとした。

解析に用いる入力地震動は、先述した工学的基盤面での Vs と基礎底面位置での Vs を比較し、その大小に応じて、基礎ごとに工学的基盤面での地震動又は一次元波動伝播解析(SHAKE)により設定した基礎底面位置での地震動のいずれかを用いた(図-2)。

設定した地震動の入力は、東南海・南海地震及び想定

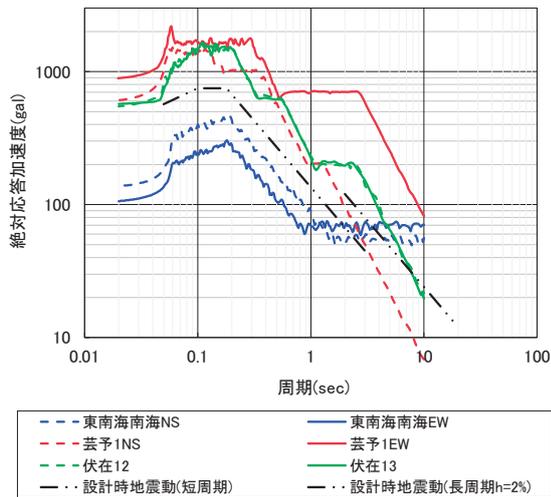


図-2 加速度応答スペクトル (第二大橋吊構造部)

Fig.2 Acceleration response spectrum of input seismic motions for 2nd Kurushima-Kaikyo Bridge

表-2 モデル要素 (第二大橋)

Table.2 Analytical element for 2nd Kurushima-Kaikyo Bridge

部位		モデル要素	減衰定数	
本橋	補剛桁	非線形ファイバー要素	1%	
	主塔	非線形ファイバー要素	1%	
	ケーブル	線形トラス要素	1%	
	支承	線形ばね要素	0%	
	基礎-地盤系	アンカレイジ	ウインクラーバネ要素	10%
		主塔	ウインクラーバネ要素	10%
	アンカレイジ 道路桁	上部構造	線形はり要素	2%
	橋脚(鋼製)	非線形ファイバー要素	1%	
高架橋	上部構造	線形はり要素	2%	
	橋脚(RC)	非線形ファイバー要素	2%	
	支承	線形ばね要素	3%	
	基礎-地盤系	線形ばね(S-R)要素	10%	

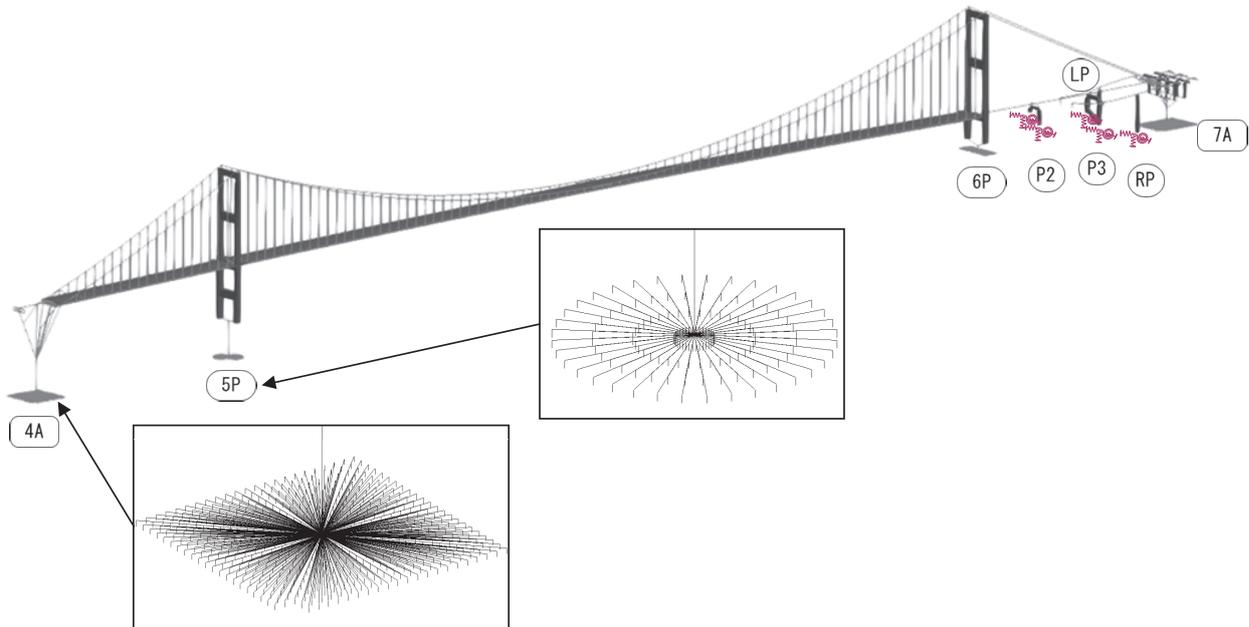


図-3 解析モデル (第二大橋)

Fig.3 Analytical model of 2nd Kurushima-Kaikyo Bridge

芸予地震については地震動の3次元的な挙動を考慮するため、水平2方向及び鉛直方向の3方向同時入力とし、伏在断層を想定した地震動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方向同時入力とした。

3.2 解析方法

耐震性能照査・設計で用いた解析モデルは、地震時の挙動を正確に把握するために付帯設備などを除く全ての部材をモデル化した3次元立体骨組モデルとした。代表として第二大橋のモデル要素を表-2、解析モデルを図-3に示す。また、解析は、来島海峡大橋が可とう性に富む橋梁であることから、材料非線形及び幾何学的非線形を考慮できる弾塑性有限変位解析により行った。

4. 耐震性能照査

4.1 橋の限界状態

来島海峡大橋は道示V編²⁾で規定されるB種の橋に区分されることから、耐震性能2を確保することが求められる。耐震性能2に対する橋の限界状態は吊構造部と高架部で区分して設定した。吊構造部については地震後の耐荷力だけでなく、復旧性なども考慮し、補剛桁、主塔、ケーブル、リンク支承などのいずれも可逆性を有する限界の状態に留め、伸縮装置及び桁遊間は衝突する限界の状態に留めるものとした。高架部については一般的な桁橋と同様に橋脚の塑性化を許容し、それ以外の部材は可逆性を有する限界の状態に留めるものとした。

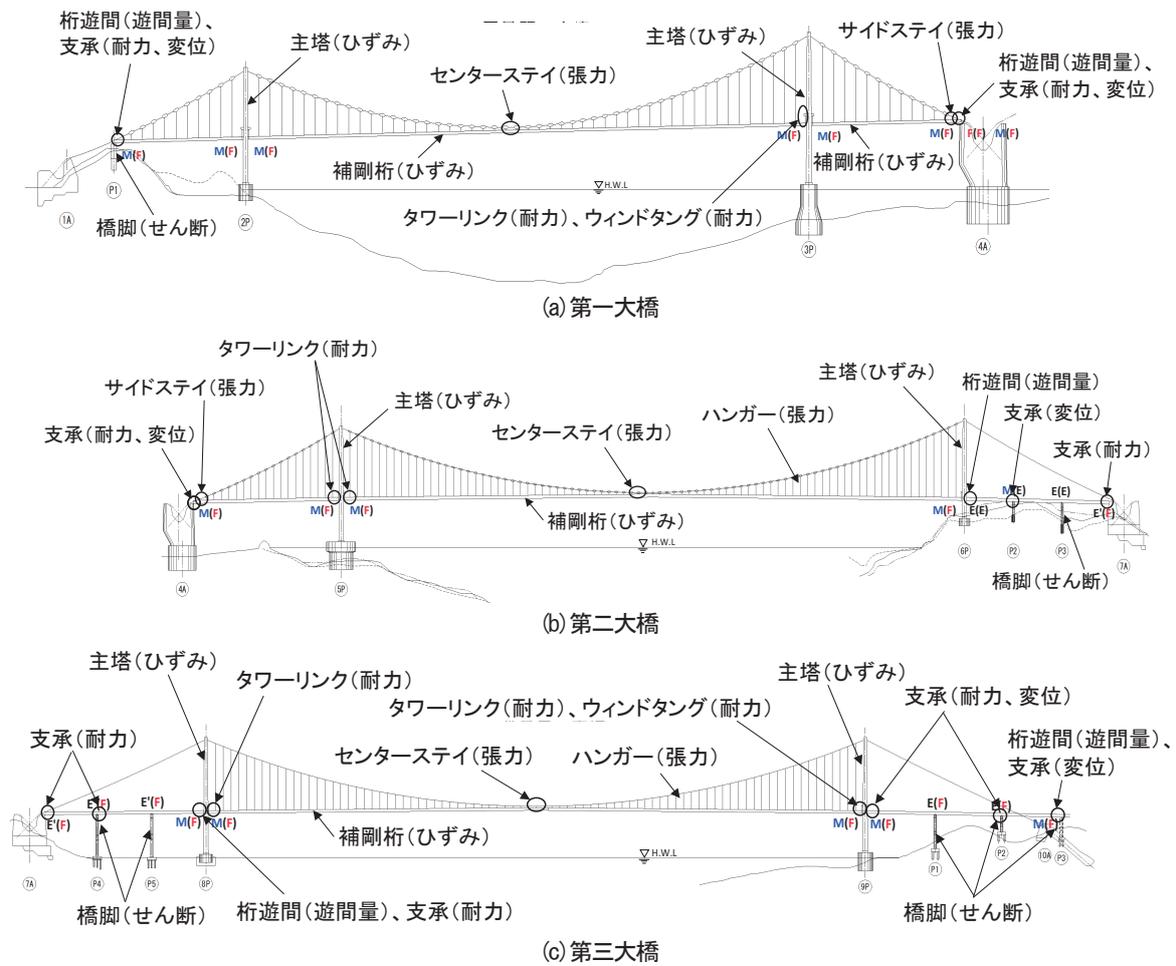


図-4 現況照査結果

Fig.4 Result of current condition

4.2 照査結果

現況照査結果を図-4に示す。なお、図中には照査を満足しない部材などとその項目を示している。図-4の結果から、主塔、補剛桁、ハンガー、センターステイ、タワーリンク、ウィンドタンクなどの各部で損傷が発生しており、これは主として橋軸方向の補剛桁の大変位に伴うもので、3橋とも同様の傾向である。これは、図-2に示す設計で考慮した地震動のうち、想定芸予地震の長周期側の加速度が大きいこと及び図-5に示す北向きを基準とした橋軸・橋軸直角方向の角度である方位角と想定芸予地震による最大加速度の関係と、橋の橋軸方向の方位角（65°）から想定芸予地震の卓越方向と橋の橋軸方向が一致したことによるものと考えられる。

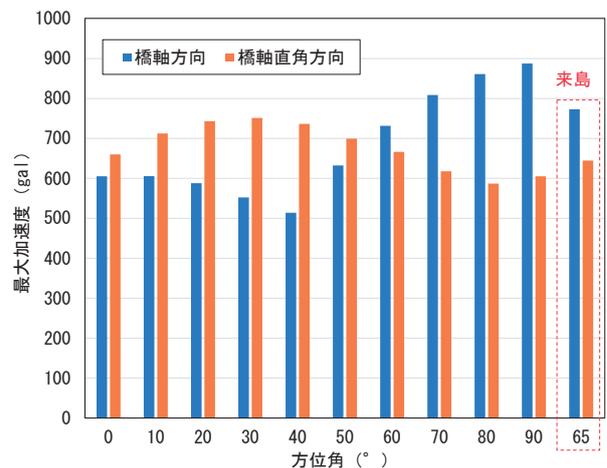


図-5 方位角と最大加速度の関係

Fig.5 Relationship direction angle and maximum acceleration

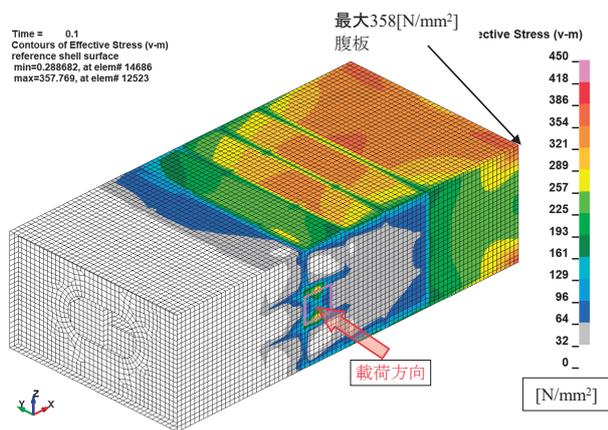
5. 耐震補強設計

5.1 補強方針

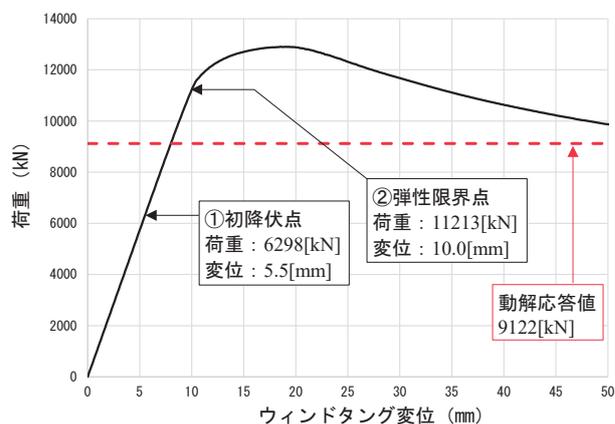
現況照査の結果、3橋ともに橋軸方向の補剛桁の大変位に起因する損傷が大半であることから、橋軸方向の補剛桁の変位を抑制したうえで、必要な補強を実施するこ

ととした。

吊橋の橋軸方向の補剛桁の変位抑制策として、主塔と補剛桁の相対変位を粘性型制震ダンパーにより吸収する方法が国外を中心に一般的に採用されている³⁾⁴⁾。しかし、粘性型制震ダンパーの減衰力は内部の粘性体に依存



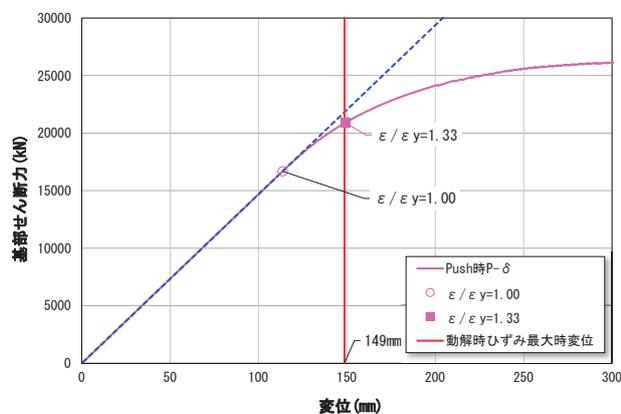
(a)応力コンター図



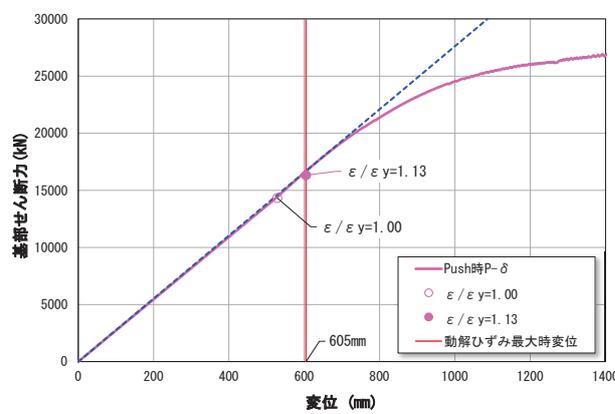
(b)荷重-変位関係

図-6 ウィンドタンクのFEM結果 (9P)

Fig.6 Result of FEM in wind tangle (9P)



(a)6P



(b)8P

図-7 主塔のプッシュオーバー解析結果

Fig.7 Result of pushover analysis for main tower

しており、その経年劣化が容易に確認できないことから、維持管理面で懸念がある。また、吊橋の主塔は主ケーブルからの作用力を塔頂サドルを介して軸方向圧縮力として基礎に伝達する部材であることから、粘性型制震ダンパーの設置に伴う孔明け加工による主塔の耐荷力への影響が懸念される。そこで、主塔と補剛桁間への粘性型制震ダンパーに代わる変位抑制策について検討することとした。なお、検討は変位抑制策を実施しない場合の橋の耐荷性能への影響評価をしたうえで、橋の耐荷性能への影響が無視できない場合に変位抑制策の検討を実施することとした。

変位抑制策を実施しない場合の橋の耐荷性能への影響評価として、動的解析の結果、3橋において損傷が想定される部材のうち、橋の耐荷性能に影響を及ぼす部材の損傷として以下の3つに着目し検討を行った。

- (1)補剛桁との衝突による主塔の降伏
- (2)主塔と補剛桁の振動性状の違いに伴い生じる鉛直方向変位によるタワーリンクの座屈
- (3)補剛桁の橋軸直角方向の変位によるウィンドタンクの座屈

このうち、(2)、(3)についてはFEMによる詳細な耐力評価を行い、部材として弾性域に留まることを確認した(図-6)。(1)についてはまず中央径間の粘性型制震ダンパーの省略を念頭に、側径間の吊構造部のみ粘性型制震ダンパーを設置した状態での動的解析結果から2P、3P、6P及び8Pで、各主塔の降伏ひずみに対する想定芸予地震2波による応答ひずみの比率の平均が1.57、1.51、1.30、1.06となり主塔が塑性化することを確認した。そこで、各主塔の耐荷力を精緻に評価するために、プッシュオーバー解析を実施した。作用させる荷重は動的解析結果から塔柱基部のひずみが最大となる時刻の抗力ベクトル(慣性力-減衰力)から設定した水平荷重を漸増载荷させた。プッシュオーバー解析結果を図-7に示す。図-7より、第三大橋(8P)については動的解析結果では主塔の一部が塑性化するものの、部材としては弾性域に留まることから変位抑制策は不要とした。一方、第二大橋(6P)については部材としても弾性域を超過しており、この結果は第一大橋(2P、3P)も同様であることから、第一大橋と第二大橋については中央径間も含め変位抑制策を検討することとした。

表-3 補剛桁の変位抑制策案

Table.3 Countermeasures for displacement of stiffening girders

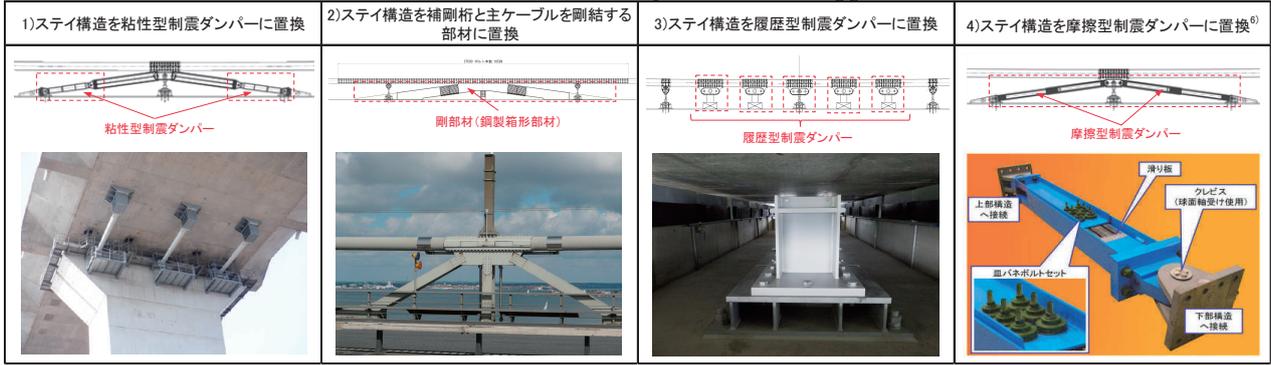


表-4 摩擦型制震ダンパーを用いた場合の照査結果

Table.4 Verification results using friction dampers

(a) 第一大橋

ケース	側径間(1A~2P)		中央径間(2P~3P)		側径間(3P~4A)		損傷度					
	ダンパー規格(kN)	設置基数	ダンパー規格(kN)	設置基数	ダンパー規格(kN)	設置基数	補剛桁	2P主塔	3P主塔	P1上揚力	4A上揚力	P1移動量
粘性型制震ダンパー設置	2,000	8	2,000	4	2,000	8	0.85	0.88	1.02	0.02	0.81	0.83
粘性型制震ダンパー設置(側径間のみ)	2,000	8	—	—	2,000	8	1.18	1.68	1.53	0.01	1.28	1.16
摩擦型制震ダンパー設置	2,000	4	1,600	8	2,000	4	0.89	0.90	0.96	0.76	0.83	0.61

(b) 第二大橋

ケース	側径間(4A~5P)		中央径間(5P~6P)		側径間(6P~7A)		損傷度				
	ダンパー規格(kN)	設置基数	ダンパー規格(kN)	設置基数	ダンパー規格(kN)	設置基数	補剛桁	5P主塔	6P主塔	4A上揚力	4A移動量
粘性型制震ダンパー設置	2,000	4	2,000	4			1.00	0.84	1.16	1.28	1.26
粘性型制震ダンパー設置(側径間のみ)	2,000	4	—	—			1.53	0.97	2.52	1.24	2.06
摩擦型制震ダンパー設置	2,300	4	3,100	8			0.84	0.85	0.87	0.99	0.93

5.2 補強設計

変位抑制策の検討にあたり、建設時から補剛桁と主ケーブルの相対変位を抑制することを意図して設置したセンターステイ及びサイドステイ（以下、「ステイ構造」という。）⁵⁾に着目し、表-3に示す4案を検討した。1)案については非抗压部材であるステイ構造に代わり、圧縮・引張の両方に効果のある粘性型制震ダンパーを設置することで、各部の応答を低減できるものの、現行のステイ構造の設置数に対し、3倍程度の数のダンパーの設置が必要であり、その場合にも主塔への衝突を抑制することは困難であった。2)案については海外での採用事例のある鋼製部材によって主ケーブルと補剛桁を剛結するもので⁷⁾、第二大橋と橋梁規模が同程度の第三大橋での検討結果から、1.2mの箱断面、板厚38mm程度の剛な鋼部材を設置することで主ケーブルと補剛桁の相対変位を抑制し、かつ補剛桁の変位に伴う各部の損傷を回避できる一方で、鋼部材を介して主ケーブル及び補剛桁に30,000kNを超える断面力が作用することで接合部の設計が成立しない。3)案については多々羅大橋にも採用されている一般的なせん断パネルに低降伏点鋼を用いた履歴型ダンパーを複数設置し、主ケーブルと補剛桁の相対変位をせん断パネルの塑性変形によってエネルギー吸収させることで各部の応答を低減できるものの、ダンパーが所定の機能を発揮する前提となる許容変位内に留めるこ

とができず、ダンパーの設計が成立しない。一方、4)案については高力ボルト摩擦接合同様に、主ケーブルと補剛桁の相対変位を摩擦抵抗によってエネルギー吸収させる方法⁸⁾である。表-4に第一大橋と第二大橋で4)案を用いた場合の各部の照査結果を、比較として主塔と補剛桁間に粘性型制震ダンパーを設置した場合の照査結果と合わせて示す。なお、表中の損傷度は許容値に対する応答値の比であり、損傷度が1.00を超えると損傷することを意味している。この結果から、粘性型制震ダンパーのみでは補剛桁との衝突により主塔が損傷するほか、4A支承の上揚力及び移動量も許容値を上回る一方で、4)案の場合は第二大橋の4A支承の移動量を除き照査を満足する結果となった。これは、粘性型制震ダンパーが速度依存性を有すること及び主塔自体も柔な構造で補剛桁と異なる振動性状であることによって、ダンパーが所定の減衰力を発揮する前に主塔と補剛桁が衝突するのに対し、4)案は粘性型制震ダンパーに比べて速度依存性が少ないこと、及び力学機構が明快な摩擦接合であることにより所定の減衰力が得られやすいことによるものと考えられる。以上から、橋軸方向の補剛桁の変位抑制策として、4)案を採用することとした。なお、4)案を採用した場合にも第二大橋の4A支承の移動量が設計値を超過するが、これについては沓座面内の移動量に留まるとともに、上部構造からの鉛直力を支持できる支圧面を確保で

きることを確認している。また、非抗圧部材であるステイ構造から圧縮・引張の両方に抵抗する摩擦型制震ダンパーに置き換えた場合の各部への影響として、a)相反応力部材としての照査、b)活荷重による疲労の照査、c)常時（温度変化、レベル1地震動）に対する照査を行い、いずれも問題ないことを確認している。

上記の検討結果を踏まえた来島海峡大橋の対策案を図-8に示す。吊構造部については、第一大橋及び第二大橋はステイ構造の摩擦型制震ダンパーへの置換に加え、主塔の耐荷力には支障がないものの、主塔と補剛桁の衝突が回避できず、大型伸縮装置への影響も懸念されることから、衝突軽減策としての主塔部への緩衝材の設置を行い、第三大橋については緩衝材の設置のみ行うこととした。また、本稿では割愛するが、高架橋部については吊構造部と同様に橋軸方向の主桁の変位に起因する損傷が生じることから、橋軸方向の応答低減のための粘性型制震ダンパーの設置、支承条件の変更などを行ったうえで、必要な橋脚補強を行う予定である。

6. おわりに

来島海峡大橋では、設計で考慮する地震動の特徴により生じる橋軸方向の補剛桁の変位に起因する損傷に対し、前例のない既存のステイ構造を摩擦型制震ダンパーに置き換えることによる補剛桁の移動抑制策を実施したうえで、必要な補強などを行う予定である。

来島海峡大橋の耐震補強により、西瀬戸自動車道の海峡部長大橋の耐震補強が完了するだけでなく、これまで順次進めてきた本四海峡部長大橋の耐震補強が完了する

ことになる。今後は来島海峡大橋の耐震補強工事の実施に加え、陸上部の耐震補強を確実に進めるとともに、今後起こり得る大規模地震に対して速やかな供用の再開が可能となるような体制構築に努めていきたい。

参考文献

- 1) 山田勝彦, 福永勸: 来島大橋の耐震設計, Vol.15, No.57, pp.42-47, 1991
- 2) (公社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 2012.3
- 3) F.SEIBL: Long Span Bridges in California – Seismic Design and Retrofit Issues, 12th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), 2000.2
- 4) S.Infanti, G.M. Castellano, A.E. Pigouni, D. Passiglia, R. Borella, D. Varotto, M. Fetti: Fluid Viscous Dampers of the IZMIT BAY BRIDGE, Turkey: Design Requirements and Full-Scale Testing, 16th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE), 2017.1
- 5) 古家和彦, 磯江浩, 帆足博明, 平野茂: 芸予地震における動態観測と来島海峡第一大橋センターステイロッド破断に対する検証, 鋼構造論文集, 第10巻, 第39号, pp.131-141, 2003.9
- 6) 国土交通省: 道路橋の耐震性向上に資する制震ダンパー技術, <https://www.mlit.go.jp/report/press/content/001423264.pdf>
- 7) Anton Petersen, 山崎康嗣: グレートベルトイーストブリッジとケーブルの詳細設計, 橋梁と基礎, Vol.28, No.1, pp.18-26, 1994.1
- 8) (財)土木研究センター: 道路橋の免震・制震設計法マニュアル(案), pp.6-69-6-73, 2011.12

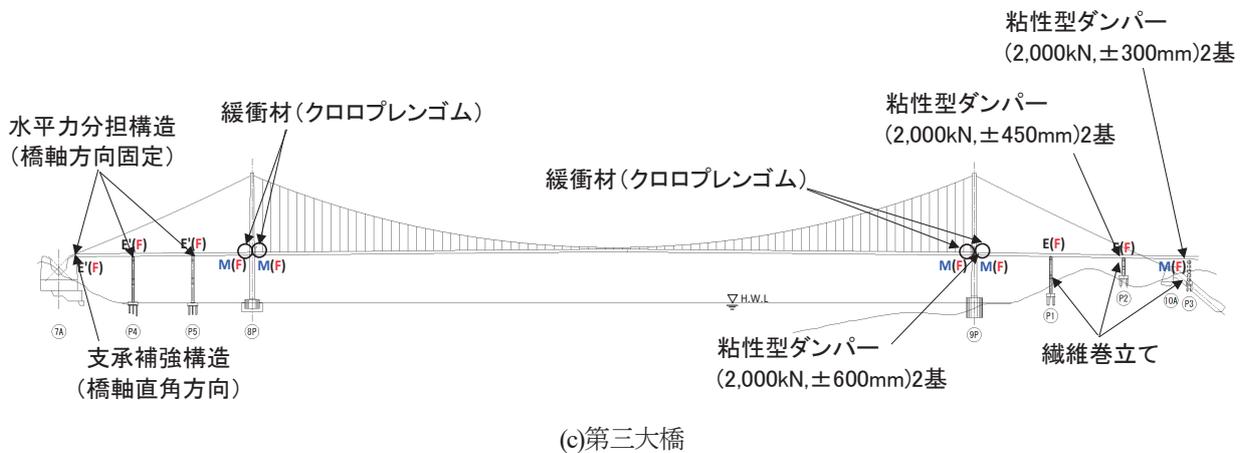
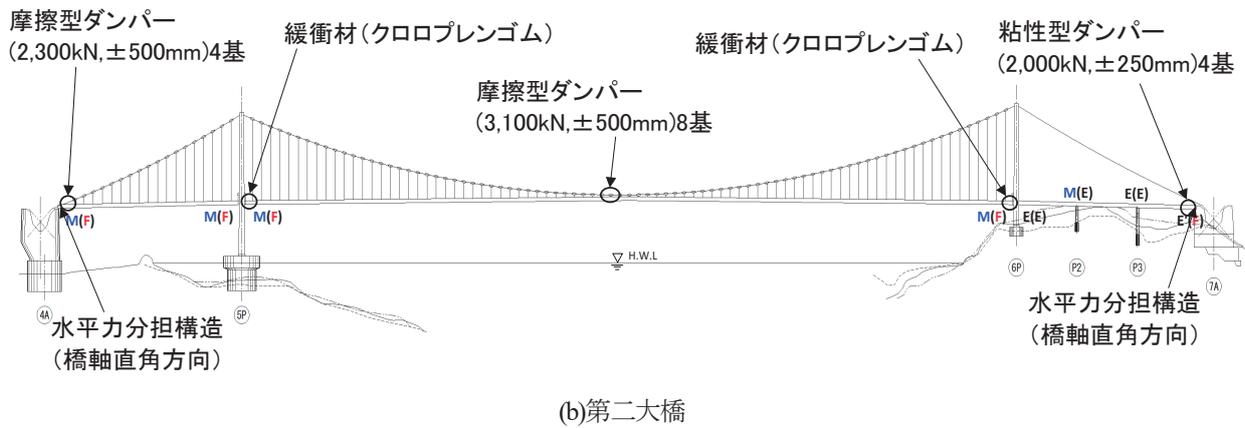
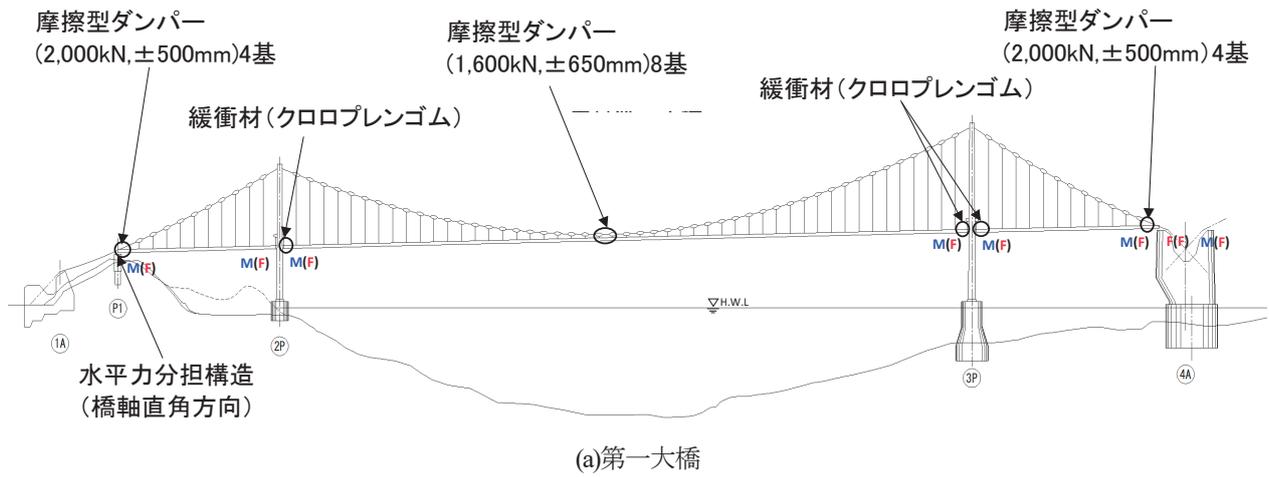


図-8 対策案 (来島海峡大橋)
Fig.8 Countermeasure for Kurushima-Kaikyo Bridge

門崎高架橋の作業車レールが耐風性に与える影響

Influence of the maintenance gantry rails on the aerodynamic stability of the Tozaki Viaduct

小見山 翔
Sho Komiyama
長大橋技術部 技術総括課

貴志 友基
Yuki Kishi
長大橋技術部 技術総括担当部長

坂本 佳也
Yoshiya Sakamoto
長大橋技術部 技術総括課長代理

概要

神戸淡路鳴門自動車道の大鳴門橋に取り付く3+4径間連続鋼床版箱桁橋である門崎高架橋は、大鳴門橋と同等の高い基本風速（50m/s）を設定しているほか、背後に岬が近接していることから、建設当初から種々の耐風性に関する検討がなされ、橋梁付属物が耐風性に影響を与えることが確認されている。

現在、維持管理方法の見直しにより不要となった箱桁下部作業車レールの撤去が検討されている。しかしながら、撤去にあたっては作業車レールの有無が耐風性に与える影響の評価が必要となるため、風洞試験を実施しその影響を確認した。本稿では、風洞試験結果と作業車レールの影響度について報告する。

The Tozaki Viaduct is a 3+4-span continuous steel box girder bridge with an orthotropic steel deck, connecting to the Ohnaruto Bridge on the Kobe-Awaji-Naruto Expressway. It was designed for a basic wind speed of 50 m/s, equivalent to that of the Ohnaruto Bridge, and was constructed along a coastal promontory. Accordingly, various investigations into aerodynamic stability have been conducted since the initial design stage, confirming that bridge appurtenances have a significant impact on aerodynamic stability.

Currently, removal of the maintenance gantry rails installed on the underside of the girder is under consideration, as they are no longer required due to revisions in inspection and maintenance practices. However, prior to removal, it is necessary to assess the influence of the rails on the aerodynamic stability of the bridge. Therefore, wind tunnel tests were conducted to investigate this influence. This paper reports the wind tunnel test results and evaluates the influence of the maintenance gantry rails.

1. はじめに

門崎高架橋は淡路島と四国を結ぶ大鳴門橋の淡路島側

に取り付く高架橋であり、支間長108mの3径間部と最大支間長190.4mの4径間部から構成される3+4径間連続鋼床版箱桁橋である（図-1）。桁形式はブラケット付きの箱桁であり、3径間部は桁高4.5mの等断面の直線橋、4径

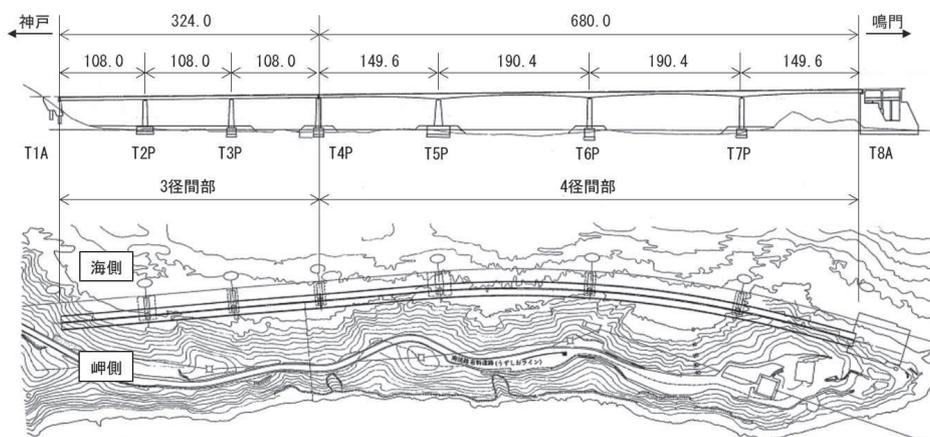


図-1 門崎高架橋一般図

Fig.1 General arrangement of Tozaki Viaduct

間部は桁高が4.5m~8.2mと変化する変断面の曲線橋となっている。3径間部及び4径間部の桁断面を図-2に示す。この橋は大鳴門橋と同等の高い基本風速（50m/s）を設定しているとともに、背後に近接する急峻な岬に沿って建設されていることから、建設当初から多くの耐風性に関する検討が実施されている。その結果、渦励振対策として全径間にダブルフラップが設置され、ギャロッピングが問題となる4径間部には支間中央に下部スカートが設置されている。

現在、厳しい腐食環境下で箱桁下部作業車レールの鋼材腐食が進行しており、安全性の低下や海上への腐食片落下が懸念されている（写真-1）。下部作業車は箱桁下面の点検や補修などのための近接手法として設置されているが、橋梁点検車の使用による維持管理方法の見直しに伴い不要となったため、作業車レールの撤去が望ましい状況となった。しかし、箱桁下面に設置されている作業車レールは、風の流れに影響を及ぼすことで橋梁の耐風性を左右するため、撤去にあたっては作業車レールの有無が耐風性に与える影響を確認する必要がある。そこで、その影響を風洞試験によって確認し、作業車レール撤去の可否について検討を行った。

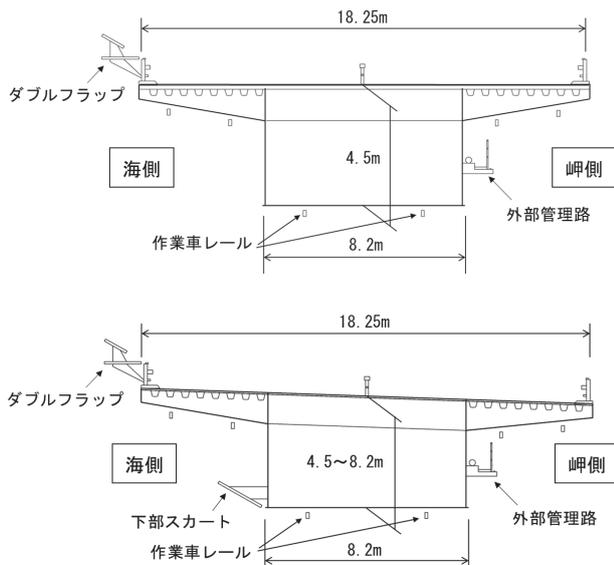


図-2 桁断面（上：3径間部 下：4径間部）
Fig.2 Box girder cross-section
(Top : three-span section ; Bottom : four-span section)



写真-1 作業車レール鋼材腐食状況
Photo 1 Steel corrosion of the maintenance gantry rails

2. 検討方法

橋桁の動的挙動を把握する風洞試験としてはばね支持試験が基本的な試験方法であるが、橋軸方向に断面が変化する場合は三次元性を考慮した評価が必要となる。そのため、これまで門崎高架橋においては、等断面である3径間部ではばね支持試験による評価がされており、変断面かつ下部スカートが支間中央にのみ設置されている4径間部では地形の影響を考慮した全橋模型試験による評価が実施されている。今回、作業車レールの有無による耐風性の変化を確認するため、3径間部についてはこれまで同様にばね支持試験を実施し、4径間部については全橋模型試験を実施できる大型風洞施設が既に解体されているため、1径間弾性模型試験を実施し、地形の影響は迎角を設定することにより考慮することとした。

3. 3径間部風洞試験

3.1 試験概要

3径間部は、二次元剛体模型を用いたばね支持試験を実施した。試験条件を表-1に示す。使用する模型は、図-2に示す断面を対象に製作した。外部管理路の更新が予定されていることを踏まえ、現在の形状（以下「現管理路」という）と更新後の形状（以下「新管理路」という）の2種類の管理路形状とした。桁及び管理路の模型を写真-2、3に示す。本試験は、ねじれを拘束したたわみ1自由度での試験とした。既往の検討結果より、現地の気流は海側からの風が卓越することから風向は海側からとし、地形の影響によって20°近い吹き上げとなることを考慮して迎角は0°~20°の範囲を対象とした。また、構造減衰については建設後の実橋振動試験結果より、 $\delta=0.05$ とした。試験状況を写真-4に示す。

表-1 3径間部試験条件

Table 1 Test conditions of three-span section

	実橋値	要求値	実測値
縮尺	—	1/48	1/48
質量	122.5 kN/m	84.6 N/model	84.3 N/model
振動数	0.8724 Hz	3.592 Hz	3.449 Hz
風速倍率	—	11.7	12.1
構造減衰	0.05	0.05	0.05

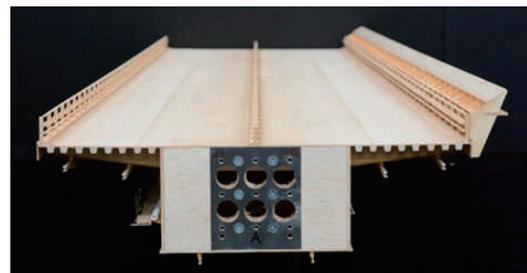


写真-2 3径間部模型
Photo 2 Model of three-span section

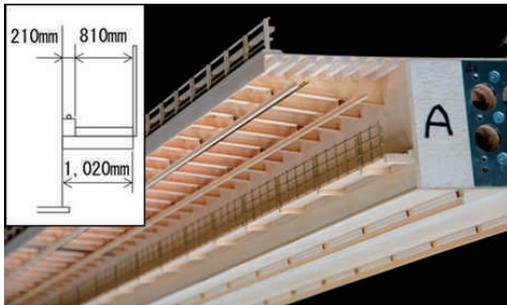
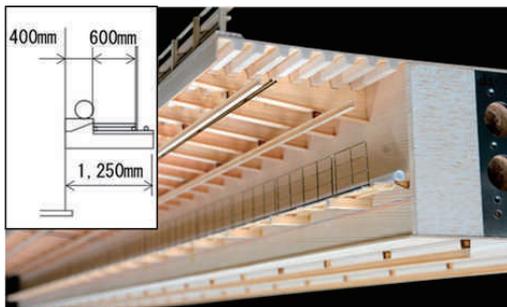


写真-3 管理路模型 (上: 現管理路 下: 新管理路)
Photo 3 Models of maintenance walkway
(Top: Existing walkway; Bottom: Planned walkway)

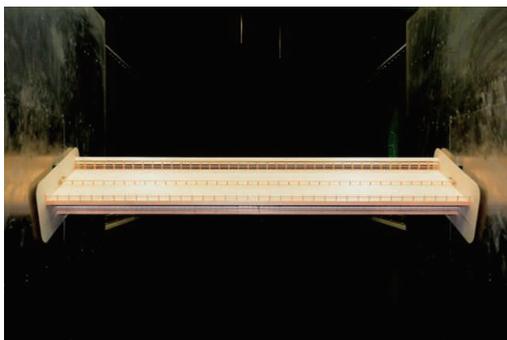


写真-4 3径間部風洞試験状況
Photo 4 Wind tunnel test setup of three-span section

3.2 試験結果

(1) 渦励振特性

渦励振の発生状況を図-3に示す。各プロットの横に記載している値は渦励振の発生風速を示している。迎角 10° において、新管理路の断面で作業車レールの有無によらず渦励振が発生し、レール無では既往の検討における許容振幅(20cm)²⁾を超過することが確認された。迎角 10° において発生した渦励振は振幅依存性のある不安定な振動(リミットサイクル)であり、ある程度の振幅で加振させた状態で風を受けた場合においてはある一定の振幅に収束し、それ以外の場合には減衰して振動がおさまることを確認している。

門崎高架橋の許容振幅は、4径間部を対象として疲労安全性と使用性を基に設定されたものであり、これを3径間部にも適用している。そこで、3径間部を対象として許容振幅の見直しが可能かについて検討を行った。4径間部の渦励振発生風速域は $16\sim 19\text{m/s}$ であるのに対し、今回の試験において確認された発生風速域は $31\sim 33\text{m/s}$ 付近と4径間部と比較して高い風速域であるため、現地

における発生頻度は既往検討時に考慮していた4径間部の発生頻度よりもかなり低くなる。加えて、リミットサイクルであることを踏まえると発生頻度は更に低くなると推察されるため、疲労安全性の観点では問題ないものと考えられる。また、通行止め基準は 25m/s であることから、対象となる風速域では通行止めとなるため、使用性の観点でも問題ないものといえる。したがって、許容振幅の見直しは可能であり、発生が認められた渦励振は許容できるものと判断した。

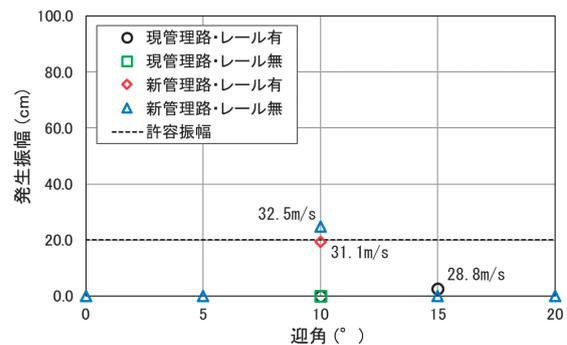


図-3 渦励振発生状況

Fig.3 Occurrence of vortex-induced vibration at various angles of attack

(2) ギャロッピング特性

ギャロッピングの発生状況を図-4に示す。既往の検討と同様に、ギャロッピングの発生風速は発生振幅が桁幅の1%を超える風速とした。結果として、迎角 10° の場合ではいずれの断面においてもギャロッピングが発生し、他迎角では確認されなかった。迎角 10° における風速と振幅の関係を図-5に示す。作業車レールを撤去した場合、わずかではあるがギャロッピングの発生風速が低下することが確認された。レール有のプロット(○, ◇)とレール無のプロット(□, △)がそれぞれ重なっていることから、管理路形状によらず傾向は一致するものと考えられる。

設計当初に適用していた耐風設計基準(1976)³⁾(以下「基準(1976)」という)では、発散振動の照査風速は設計風速の1.2倍とし、 $\pm 7^\circ$ の範囲を対象として傾斜角に応じて照査風速範囲が定められている。しかし、3径間部は地形の影響によって 20° 近い吹き上げとなることを考慮して傾斜角によらず 90m/s とした場合、いずれの断面においても照査風速を下回る。一方、現行基準である本州四国連絡橋耐風設計基準(2001)⁴⁾(以下「基準(2001)」という)で規定される照査風速では、いずれの断面でも照査を満足する。また、前回試験時に確認されたギャロッピング発生風速である 75.3m/s から低下しておらず、現状の耐風性を低下させるものではない。したがって、作業車レールを撤去した場合においても耐風性は確保されているものと判断した。

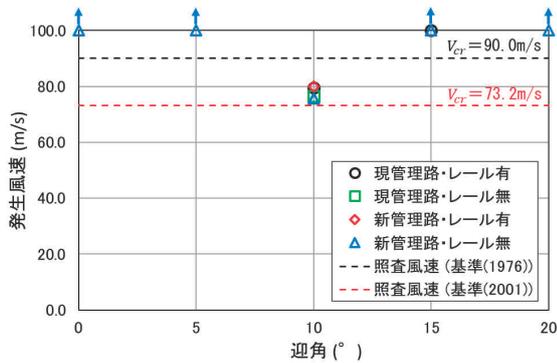


図-4 3径間部ギャロッピング発生状況
Fig.4 Occurrence of galloping at various angles of attack
(Three-span section)

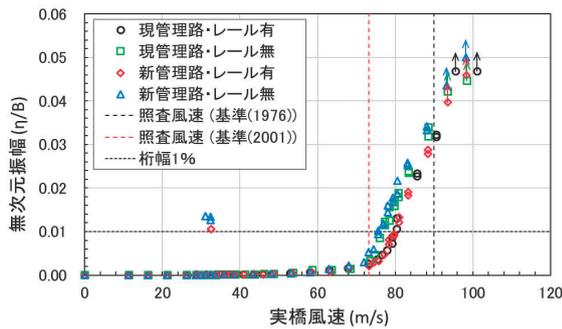


図-5 風速と振幅の関係 (迎角 10°)
Fig.5 Vibration amplitude as a function of wind speed
(angle of attack : 10°)

3.3 3径間部まとめ

迎角10°の場合において、渦励振及びギャロッピングの発生が認められた。しかしながら、他迎角では顕著な振動は発生しておらず、発生した振動は許容可能なものであるため、いずれの断面においても耐風性は確保されているものと判断した。また、作業車レールの有無による有意な差は認められず、撤去は可能であると考えられる。

4. 4径間部風洞試験

4.1 試験概要

4径間部は、1径間弾性模型試験を実施した。試験条件を表-2に示す。本試験では、4径間のうちT5P-T6P間の1径間を対象として、この部分の振動モードを桁内部に配置する剛性棒で再現し、その周りに桁形状を再現した外形材を配置することで模型を製作した。また、質量分布は、付加錘を取り付けて橋軸方向分布を相似した。なお、4径間部については既に管理路が更新済みのため、管理路形状は1種類とした。

4径間部においては、既往の検討結果⁵⁾より、4°~14°程度の気流傾斜角が生じることから、迎角は0°~20°とし、卓越する海側からの風を対象とした。また、構造減衰については $\delta=0.05$ とした。装置の機構上、模型を5°までしか回転させることができないため、傾斜版を設置して風を吹き上げさせることで迎角20°まで測定した。風洞試

験状況及び剛性棒を写真-5, 6に示す。

表-2 4径間部試験条件

Table 2 Test conditions of four-span section

	実橋値	要求値	実測値
縮 尺	—	1/120	1/120
振 動 数	0.399 Hz	4.37 Hz	4.19 Hz
風 速 倍 率	—	10.95	11.43
構 造 減 衰	0.05	0.05	0.05

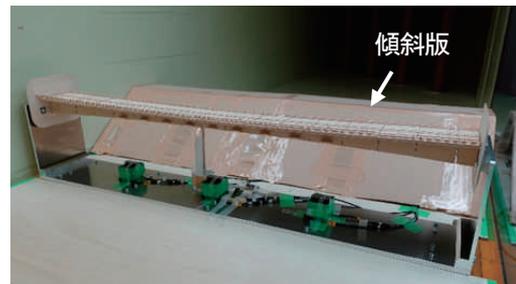


写真-5 風洞試験状況 (4径間部模型・傾斜版)
Photo 5 Wind tunnel test setup (model of four-span section and inclined plate for adjusting angle of attack)



写真-6 剛性棒
Photo 6 Rigid rod

4.2 試験結果

(1) 渦励振特性

いずれの断面においても渦励振の発生は認められなかった。既往の検討時においても渦励振はほとんど発生しておらず、本試験でも同様の傾向であったため渦励振については問題ないものと判断した。

(2) ギャロッピング特性

ギャロッピングの発生状況を図-6に示す。既往の検討時と同様に、ギャロッピングの発生風速は発生振幅が桁幅の1%を超える風速とした。結果として、作業車レールの有無によらず、迎角0°及び5°の場合においてギャロッピングの発生が認められた。迎角0°及び5°における風速と振幅の関係を図-7に示す。迎角0°では桁幅の1%程度までの振幅となり、迎角5°では比較的大きい振幅となったものの、いずれも振幅は定常的であり発散的な振動は確認されなかった。また、迎角5°において、作業車レール無の断面では高風速域で振幅が大きくなることが確認された。

3径間部と同様に、基準（1976）及び基準（2001）における照査風速を図-7に示している。4径間部においても4°~14°程度の吹き上げとなることから、設計当初に適用していた基準（1976）で規定される照査風速を傾斜角によらず一定とした場合、迎角0°のレール有の断面以外は照査を満足せず、基準（2001）で規定される照査風速においても迎角5°は満足しない結果となった。しかしながら、既往の地形模型を用いた気流計測結果⁶より、迎角5°となるのはT6P-T7P間のみと限定的であり、全橋模型試験時には顕著な振動は確認されていないことから、全橋においては振動が抑制されるものと考えられる。

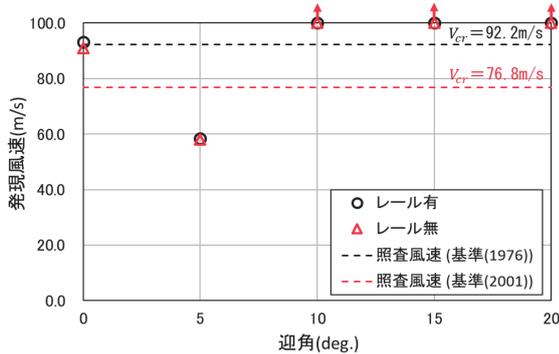


図-6 4径間部ギャロッピング発生状況
Fig.6 Occurrence of galloping at various angles of attack (Four-span section)

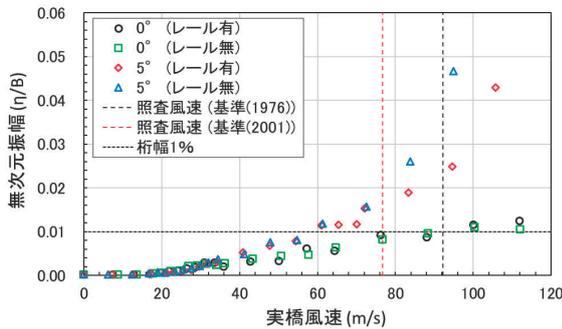


図-7 風速と振幅の関係 (迎角 0° 及び 5°)
Fig.7 Vibration amplitude as a function of wind speed (angles of attack: 0° and 5°)

照査を満足しなかった迎角5°において、発散的な振動は確認されなかったため、応力による安全性の評価を検討した。建設時の検討結果より、活荷重無載時における許容応力から算出される許容振幅は、風荷重に対する割増 (1.25) を考慮すると646mm、初通過破壊に対する割増 (1.70) を考慮すると899mmとなる。これらを踏まえた迎角5°における風速と振幅の関係を図-8に示す。結果として、レール有の断面ではいずれの割増を考慮した場合も満足し、レール無の断面では照査風速以下において割増1.25を考慮した振幅には達するものの、割増1.70を考慮した振幅には至らなかった。したがって、大振幅の振動が発生するものの、弾性域にとどまることを確認した。

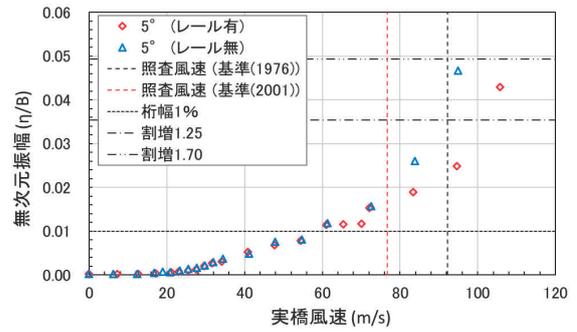


図-8 風速と振幅の関係 (応力割増考慮)
Fig.8 Vibration amplitude as a function of wind speed (with allowable amplitude considering stress amplification)

(3) 乱流試験

実環境下における風の乱れによる影響の確認のため、乱流試験を行った。基準（2001）において、発散振動の照査にあたっては主流方向流れ強さとして10%を考慮するものとされており、現地風観測結果から主流方向流れ強さが10~15%程度であることを踏まえ、本試験での主流方向流れ強さは10%とした。

試験結果を図-9に示す。一様流での結果と比較して、乱流ではガスト応答による振動が確認された。しかしながら、初通過破壊を考慮した振幅は満足しており、発散的な振動に至らないことが認められたため、風の乱れを受ける実環境下においても耐風性は確保されているものと考えられる。

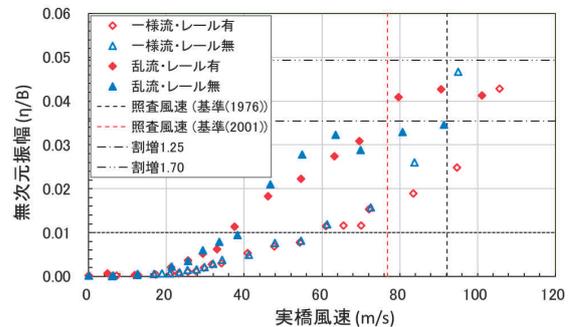


図-9 風速と振幅の関係 (一様流・乱流)
Fig.9 Vibration amplitude as a function of wind speed under uniform and turbulent flow conditions

4.3 4径間部まとめ

迎角0°及び5°の場合においてギャロッピングの発生が認められたものの、明らかな発散振動には至らず、迎角5°以外では顕著な振動は確認されなかった。また、実橋において迎角5°となるのは限定的な部位のみであり、過去に実施した全橋模型試験結果より全橋においては振幅は抑制されるものと推察される。さらに、乱れを受ける実環境下においても初通過破壊に対する安全性は確保しているため、耐風性は確保されているものと判断した。また、作業車レールを撤去することによって高風速域で振幅が大きくなるものの、同様に安全性は確保されていることから、撤去は可能であると考えられる。

5. 風洞試験結果総括

3径間部及び4径間部のそれぞれを対象とした風洞試験によって以下に示す結果が得られた。これらの結果より、両径間とも作業車レールの撤去は可能であると考えられる。

1) 3径間部

- ・迎角10°において、新管理路の断面では既往の検討における許容振幅を超過する渦励振が発生するが、現地での実際の振動発生頻度を考慮すれば許容できる振幅であり、疲労及び使用性の観点で問題は無い。
- ・迎角10°において、断面によらずギャロッピングが発生するが、前回検討時において確保されている耐風性を低下させるものではない。
- ・迎角10°以外では顕著な振動は確認されていない。
- ・作業車レールの有無による有意な差は認められない。

2) 4径間部

- ・迎角0°及び5°でギャロッピングが発生し、照査風速を満足しないが、明らかな発散振動には至らない。
- ・照査風速における振幅でも、初通過破壊に対する安全性は確保されている。
- ・迎角5°以外では顕著な振動は確認されていない。
- ・現地で迎角5°となるのは限定的な部位のみであり、全橋を考えた場合には振動が抑制されると推察される。
- ・風の乱れを受けた場合においても初通過破壊に対する振幅は満足しており、実環境下においても安全性は確保されている。
- ・作業車レールを撤去することにより高風速域で振幅が大きくなるものの、撤去後においても耐風性は確保されている。

6. おわりに

維持管理方法の見直しによって不要となった門崎高架橋の下部作業車レールの撤去を目的として、作業車レールが耐風性に与える影響の評価を行った。その結果、作業車レール撤去後の断面においても耐風性は確保されており、撤去は可能であることが確認された。

作業車レールの撤去が可能となることにより、レールの点検や補修、更新などの維持管理及び作業車本体の整備などが不要となるため、維持管理コストの低減に寄与されるものと考えられる。

謝辞

本検討にあたっては、本四高速と横浜国立大学との共同研究にて4径間部風洞試験を実施した。また、検討を進めるにあたり、横浜国立大学大学院勝地弘教授、王嘉奇講師に多大なご協力及びご助言をいただいた。ここに記し、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 楠原栄樹：門崎高架橋（3径間部）の耐風安定性の再評価、本四技報、Vol.26, No.99, pp.13-17, 2002.09
- 2) 宮下力、大橋治一、樋上琇一、藤沢伸光、宇野裕恵：門崎高架橋の耐風安定性、橋梁と基礎、Vol.18, No.2, 1984.02
- 3) 本州四国連絡橋公団：耐風設計基準（1976）・同解説、1976.03
- 4) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋耐風設計基準（2001）・同解説、2001.08
- 5) 楠原栄樹、遠山直樹：門崎高架橋（4径間部）の耐風安定性の再評価、本四技報、Vol.27, No.101, pp.2-7, 2003.09
- 6) 杉本高志、松田一俊、楠原栄樹：完成後に得られた減衰特性と気流特性を考慮した「門崎高架橋」（4径間部）の耐風性再調査、石川島播磨技報、Vol.46, No.1, pp.39-45, 2006.03

瀬戸大橋の塗替え塗装工事の現況

Current progress of the repainting work on the Seto-Ohashi Bridge

波多野 文人

Fumito Hatano

坂出管理センター 保全課

(前)本四高速道路ブリッジエンジニア

児島保全センター 保全2課

北村 岳伸

Takenobu Kitamura

本四高速道路ブリッジエンジニア

技術事業本部 技術開発部 技術1課長

(前)保全部 橋梁保全グループ

概要

瀬戸大橋は飛来塩分の多い厳しい腐食環境下にあるため、建設時より重防食塗装系が採用されており、供用後も予防保全の観点から体系的な塗替え塗装が行われてきた。2006年度から開始された1巡目の全面塗替え塗装工事は、2024年度に全て完了し、今後は2巡目以降の維持管理段階に移行することとなる。

本稿では、塗装仕様及びその変遷、点検と劣化評価、トラス橋部における施工上の課題と技術的工夫、今後の展望について、1巡目の塗替え塗装工事の総括として報告する。

Due to the harsh corrosive environment of the Seto-Ohashi Bridge, which is exposed to airborne salt particles, heavy-duty coating has been adopted since its construction. After the bridge was opened to traffic, systematic repainting work has been carried out as a preventive maintenance measure. The first full-scale repainting work, which was begun in fiscal year 2006, was completed in fiscal year 2024. From now on, the maintenance will enter the second cycle.

In this paper, the first repainting cycle are summarized, including the coating specifications and their transition, the inspection and the degradation assessment of painting, technical issues and innovations of repainting work in the truss bridge, and the future outlook.

1. はじめに

瀬戸大橋は、本州と四国を結ぶ3ルートの中核に位置し、岡山県倉敷市と香川県坂出市を結ぶ全長約10kmに及ぶ瀬戸中央自動車道の一部であり、上段に瀬戸中央自動車道、下段に本四備讃線が設置された道路鉄道併用橋である。1988年に供用が開始され、吊橋3橋、斜張橋2橋、トラス橋1橋と複数の橋梁形式を有し、世界的にも例の少ない大規模な海上橋梁群である。(写真-1)



写真-1 瀬戸大橋の概要

Photo1 Panoramic view of Seto-Ohashi Bridge

瀬戸大橋は、飛来塩分の多い厳しい腐食環境下にあるため、建設時より重防食塗装系が採用されており、供用

後も予防保全の観点から体系的な塗替え塗装が行われてきた。2006年度から開始された1巡目の全面塗替え塗装工事は、2024年度に全て完了し、今後は2巡目以降の維持管理段階に移行することとなる。

本稿では、塗装仕様及びその変遷、塗膜点検と劣化評価、トラス橋部における施工上の課題と技術的工夫、今後の展望について、1巡目の塗替え塗装工事の総括として報告する。

2. 塗装仕様及び塗替えの経緯

2.1 建設時の塗装仕様

本州四国連絡橋の建設時には、長期的な防食性能が求められたことから、重防食塗装系が全面的に採用されている。上塗り塗料については、橋梁の供用時期に応じて異なる仕様を採用されており、たとえば明石海峡大橋以降の橋梁では、耐久性と塗替え周期の延伸を目的としてふっ素樹脂系塗料が使用されている。一方、それ以前に建設された橋梁ではポリウレタン樹脂塗料が主に用いられている。(表-1) 下地には全ての橋梁で犠牲防食作用を期待した無機ジンクリッチペイントが施されている。

表-1 建設時の塗装仕様

Table1 Coating Specifications at the time of construction

塗装系		ふっ素樹脂塗料	ポリウレタン樹脂塗料
対象橋梁		明石海峡大橋 新尾道大橋 多々羅大橋 来島海峡大橋	大鳴門橋 瀬戸大橋 因島大橋 生口橋 伯方・太島大橋
素地調整	1次	厚板アラト +無機ゾウカブリヤー	厚板アラト +無機ゾウカブリヤー
	2次	製品アラト	製品アラト
第1層		厚膜型無機ゾウカブリヤー (75μm)	厚膜型無機ゾウカブリヤー (75μm)
第2層		シート	シート
第3層		厚膜型ポリウレタン樹脂塗料 下塗り(60μm)	厚膜型ポリウレタン樹脂塗料 下塗り(60μm)
第4層		厚膜型ポリウレタン樹脂塗料 下塗り(60μm)	厚膜型ポリウレタン樹脂塗料 下塗り(60μm)
第5層		ポリウレタン樹脂塗料 中塗り(30μm)	ポリウレタン樹脂塗料 中塗り(30μm)
第6層		ふっ素樹脂塗料 上塗り(25μm)	ポリウレタン樹脂塗料 上塗り(30μm)
合計膜厚		250μm	255μm

2.2 塗料の変遷

瀬戸大橋において、当初に採用された上塗り塗料はポリウレタン樹脂塗料であったが、塗替え塗装においては、技術開発に伴い、より耐候性に優れたふっ素樹脂塗料が導入された。2010年からは更に耐久性の優れた高耐久性ふっ素樹脂塗料に変更し、現在では省工程型ふっ素樹脂塗料が採用され、施工効率の向上及び環境負荷の低減に資する仕様となっている。塗装仕様の見直しは、性能向上とLCC削減の両立を目的として継続的に行われている。(図-1)

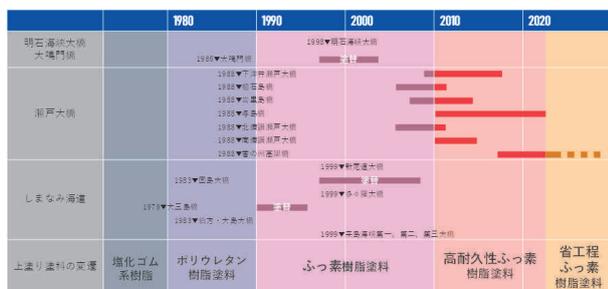


図-1 上塗り塗料の変遷及び塗替え塗装の経緯

Fig.1 Transition of top coating and repainting history

2.3 塗替え塗装の経緯

1巡目の全面塗替え塗装は、2006年度に開始された。塗装面積は約180万㎡に及び、年間8~10万㎡を目標に15年以上の計画で段階的に実施された。当初(1988年~2000年代初頭)は、塗膜の状態調査を継続的に実施しつつ、局所的な塗膜損傷箇所への部分補修塗装を中心に対応していたが、定点調査の結果や下塗り無機ジンク層の消耗予測から、全面塗替えの必要性が顕在化していった。塗替えの順序は、初期の変状が多く見られた櫃石島橋、岩黒島橋、北備讃瀬戸大橋などから着手し、以降は、定点調査に基づく劣化データを反映して、塗替え時期や優

先順位を決定してきた。

2024年度には、最後に残ったトラス橋部における塗替え塗装工事を終え、約18年の期間を経て、海峡部橋梁の1巡目の全面塗替え工事が完了した。

2.4 予防保全の基本方針

本四高速では、「200年以上の長期利用」を視野に入れた予防保全方針のもと、塗膜劣化の早期発見及び防食下地層の保護を基本とした塗替え方針がとられている。特に塗装系においては、下地層に無機ジンクリッチペイントを採用しており、この下地層を保全することがライフサイクル全体のコスト最適化において極めて重要である。無機ジンクリッチペイントは、含有する亜鉛粉末による犠牲防食作用により、鋼材に対して優れた長期防食性能を発揮する。鋼材と直接電氣的に接触することで、鉄よりも電位の低い亜鉛が先に溶解し(アノード作用)、赤さび発生を抑制するメカニズムを持つ。このため、塗膜の一部に損傷が発生しても、鋼材自体の腐食進行を防ぐ能力が高く、部分補修時にも鋼材の健全性が確保されやすいという特徴がある。しかしながら、この下地層の再施工は、素地調整や施工環境の面から難易度とコストが高いため、中塗り・上塗り層の維持管理を通じて無機ジンク層を長期的に保護しつつ計画的に更新する手法がとられている。これにより、鋼構造物の長寿命化が実現されている。

3. 塗膜点検及び塗膜劣化の評価

3.1 塗膜点検手法

塗膜の点検は主に以下の3種に分類される。

- (1) 塗膜基本点検：5年に1回、全体の塗膜変状を早期に発見し、全面塗替え塗装までの間、鋼材及び塗膜を健全に保つために橋梁全体を近接目視により行う点検である。
- (2) 塗膜評価点検：1橋梁全体の塗膜劣化傾向を把握し、全面塗替え、部分塗替えの必要性の判断又は塗替え順序などを検討するための資料を得る点検であり、目視により行う点検である。点検時期は、塗膜基本点検又は全面塗替え塗装計画に基づき全面塗替え塗装及び部分塗替え塗装の検討が必要な時に橋梁ごとに決定する。
- (3) 塗膜詳細調査：部材に設置された定点において、塗膜の状況を定量的に把握し、「全面塗替え塗装」時期の判定のための資料を得ることを目的に計器を用いて行う精密調査であり、橋梁ごとに決められた定点で行う定点調査と無作為に選定した箇所において行う残存膜厚調査がある。調査頻度は、定点設置時を1回目とし、2回目以降は3, 5, 8, 10年目以後は5年毎に実施することを原則としている。

塗膜基本点検及び塗膜評価点検は、目視による変状

部分の早期発見と緊急度に応じた塗替え作業計画の立案を目的としている。塗膜詳細調査は、同一箇所です計測機器を使用した客観的・定量的な変状把握と塗膜変状の将来予測により、全面塗替え計画立案のための基礎資料を得るために実施している。(図-2)

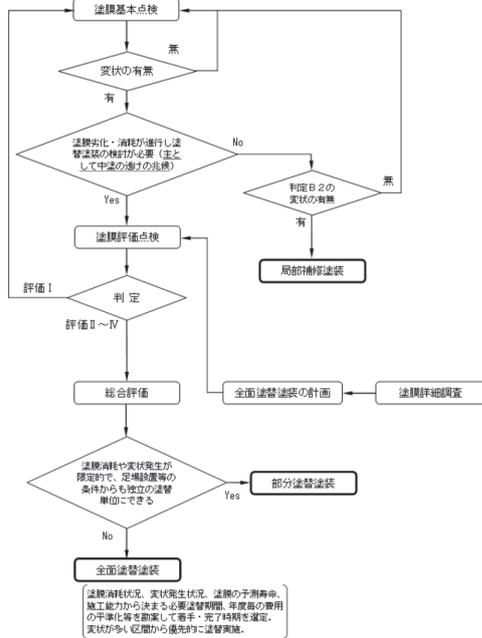


図-2 塗替塗装の選定フロー

Fig.2 Selection flow of repainting method

全面塗替え塗装は、塗膜詳細調査による塗膜消耗量から塗膜劣化曲線を作成し、下塗りの消耗が始まる前に塗替え塗装を完了するよう計画している。(図-3) 塗膜消耗量は、橋梁位置や部位により異なるため、定点を設置して継続的に調査を実施している。

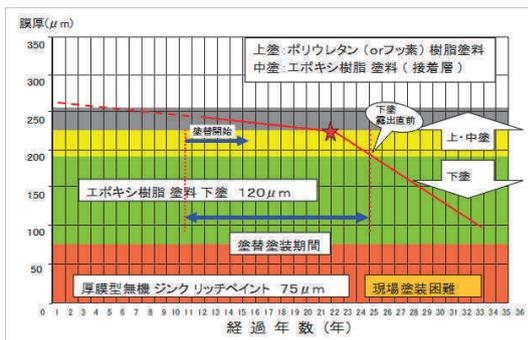


図-3 塗膜消耗と塗替時期

Fig.3 Coating degradation and repainting period

4. トラス橋部における施工上の課題と技術的工夫

4.1 施工体制

作業や検査項目を定めた「保安全管理要領」に基づいて塗替え塗装を施工するために、2級土木施工管理技士

(鋼構造物塗装)や防錆管理士の資格を有する塗装管理者を常駐させ、品質管理をはじめ、作業工程や社内検査の調整、作業環境の管理を総括に当たっている。また、塗装作業員には各班に1級塗装技能検定合格者か鋼橋塗装経験が10年以上あるものを1名以上配置することとしている。

4.2 品質管理

作業着手前に、旧塗膜の外観観察や、新旧塗料の相性を見るためのリフティング試験、粘着テープを用いた付着力試験を行い、健全性を確認している。付着力試験は、素地調整の程度を判断する重要な情報となる。また、被塗面に塩分が残っていると塗膜の耐久性が低下するため、素地調整の実施前に水洗いなどで除去しなければならない。

素地調整の品質はその後に施工する塗装の品質に大きく影響することから、素地調整完了後は全ての範囲の立会検査を行っている。特に、膜厚の確保が難しい部材の角部には注意を払っている。

また、塗装管理者と同等の資格を有する塗装管理専任者を作業現場に配置し、素地調整、膜厚測定、塩分測定、水洗い、塗料の適合性確認など多項目にわたる品質管理を徹底している。

4.3 施工上の課題

1巡目塗替えの終盤となるトラス橋部(図-4)では、以下のような課題が存在した。

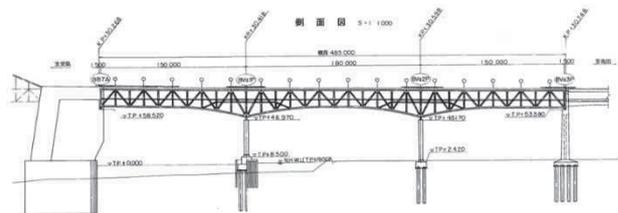


図-4 番の州高架橋トラス部 側面図

Fig.4 Side view of Bannosu viaduct

(1) 資材置場の確保

海峡部橋梁では資材置場を確保することが困難である。管理路などへの一時的な仮置きは可能であるが、容量や荷重制限、通行への支障といった制限から、大量の資材を仮置きできない。特にトラス桁は、吊橋などに比べて桁高が高く、大量の足場資材を使用するため、資材搬入後の保管スペースをより大きく確保する必要があった。

(2) 資材搬入経路の制限

吊橋(補剛桁)では路上から上横構の隙間を通して管理路上へ資材を直接搬入することが可能であった。しかし、トラス橋(トラス桁)は構造上、同様の方法では管理路への資材搬入ができず、搬入経路の工夫が必要となった。

(3) トラス構造への接近手段

吊橋や斜張橋の塗替え塗装は杵組足場と桁外面作業車を併用して実施したが、トラス橋においては桁外面作業車（側面フレーム）とトラス桁の遊間が狭く、足場仮設後は桁外面作業車の走行ができなくなる。また、主構下弦材が傾斜しており、足場を設置できる場所が存在しないことから、足場の支持方法を検討する必要があった。

(4) 鉄道営業線との近接施工

瀬戸大橋は道路鉄道併用橋であり、作業箇所と鉄道営業線が近接するため、列車運行の安全を確保しなければならない。

これらの課題に対し、これまでの海峡部橋梁での塗替え塗装の経験を踏まえ、トラス橋に特有の施工課題に対応するための方策を講じた。次節では、その具体的な対応策について述べる。

4.4 技術的工夫

(1) 資材置場の確保及び資材搬入経路の制限

荷下ろし用張り出しステージ（以下「ステージ」という。）（写真-2）をトラス桁（主構）より海側にステージを張り出して設置することにより、資材の搬入・保管スペースを確保することができ、効率的な搬入出を可能とした。（図-5）



写真-2 荷下ろし用ステージ

Photo2 Spacious scaffolding for carrying in materials



図-5 ステージを使用した搬入出作業

Fig.5 Material handling work with Spacious scaffolding

(2) トラス構造への接近手段

吊り足場を設置した下弦材・下横構以外への接近手段として、杵組足場及び単管足場を架設した。足場が設置可能な場所が存在しないため、杵組足場を支持する架台を設計・製作し、下弦材上に設置後、その上に足場を組

み立てることとした。

(i) 主構下弦材

主構下弦材のうち、傾斜のない水平部には、以下に示すような架台を設置した。（図-6）（写真-3）主構下弦材を囲うような台形の骨組みとした。

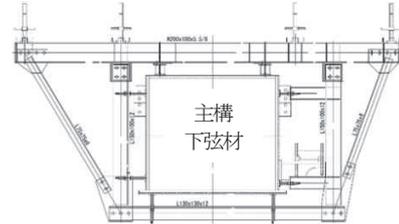


図-6 架台設置図（水平部）

Fig.6 Trestle for horizontal lower chord member



写真-3 足場設置用架台（水平部）

Photo3 Trestle for horizontal lower chord member

この架台は、架台の接地面（主構下弦材の上面）と足場の接地面が平行になる構造であり、この架台を傾斜した部材に設置すると、足場の接地面も同様に傾いてしまう。足場の接地面は水平にする必要があるため、この架台を傾斜のある主構下弦材に設置して使用することは不可能である。（図-7）そこで、足場の接地面を水平にするため、傾斜部用の架台を別途製作することとした。

（図-8～10）（写真-4）

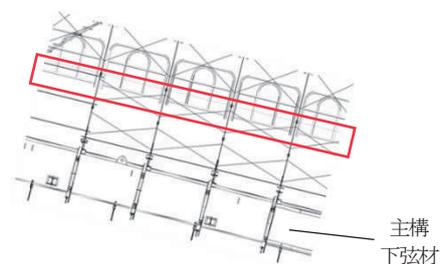


図-7 不適切な架台の設置例

Fig.7 Inappropriate trestle

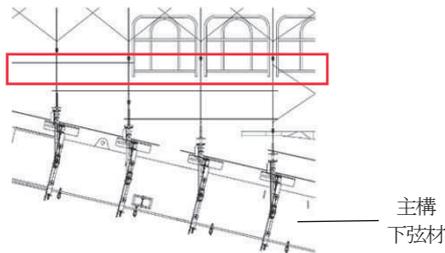


図-8 適切な架台の設置例
Fig.8 Appropriate trestle

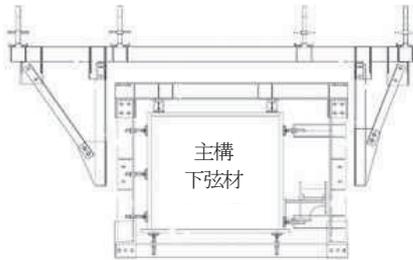


図-9 傾斜部用の架台（橋軸方向）
Fig.9 Trestle for inclined lower chord member
(Longitudinal direction)

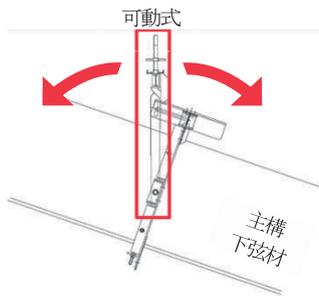


図-10 傾斜部用の架台
Fig.10 Trestle for inclined lower chord member



写真-4 傾斜部用の架台
Photo4 Trestle for inclined lower chord member

図-10に赤枠で示す部分のような、可動式の機構を採用することにより、主構トラスの勾配によらず、足場の接地面を水平に保つことが可能となった。

(ii)主横下弦材

主横下弦材には、水平部用架台（図-11）を使用する正方形型や、傾斜部用架台（図-12）を使用する平行四辺形型などが存在する。2種類の架台を使い分けること

により、傾斜のある部材にも架台を設置することができた。

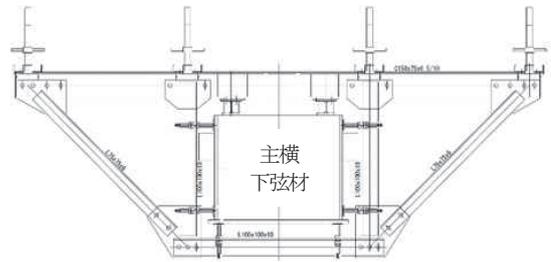


図-11 水平部用架台（橋軸直角方向）
Fig.11 Trestle for horizontal lower chord member
(Transverse direction)

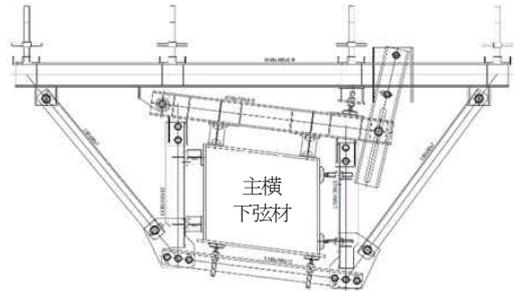


図-12 傾斜部用架台（橋軸直角方向）
Fig.12 Trestle for inclined lower chord member
(Transverse direction)

(3) 鉄道営業線との近接施工

鉄道階より上部での足場の組立作業は鉄道営業線近接作業となるため、営業線工事保安関係標準示方書（在来線）の定める資格認定証を保有する工事管理者及び列車見張員（写真-5）を配置した。

列車見張員が列車接近の合図を行った際には、その合図を作業者全員で復唱し、列車通過時には作業を一時中断するなど、細心の注意を払いながら施工を行った。

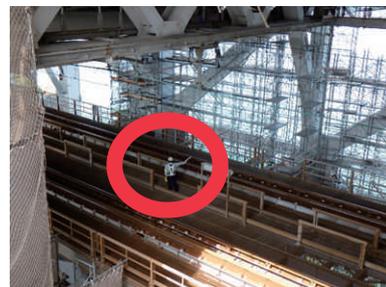


写真-5 列車見張員配置状況
Photo5 Train watchman

また、足場組立完了後に設置するネットを使い分けることにより、線路上への資機材などの飛散対策を行った。通常は網目の大きさが100mmのネットを設置するが（写真-7に格子で示した部分）、線路に近接する妻面（写真-7に斜線で示した部分）のみ網目の大きさが15mmの

ネットを設置した。(写真-6)



写真-6 ネット設置状況 (1)
Photo6 Installation of net (1)

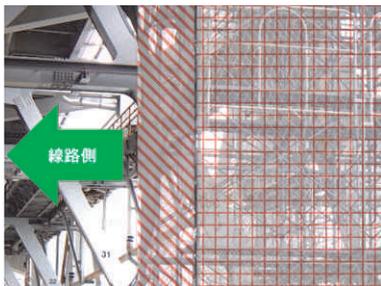


写真-7 ネット設置状況 (2)
Photo7 Installation of net (2)

5. 今後の課題と展望

2006年度より着手した瀬戸大橋の1巡目全面塗替え塗装は、2024年度をもって完了した。塗替え塗装工事は、維持修繕費の中でも大きな割合を占めるため、その効率化及びコスト削減は今後の重要課題である。2巡目以降の塗替えに向けては、以下のような取組が期待される。

(1) 維持管理作業の高度化・効率化

塗替え塗装や点検を含む維持管理作業の高度化・効率化を目指し、長大橋維持管理の情報プラットフォームと連携した点検ロボットの開発と実装、モニタリングの自動化、トラス橋部の塗装作業における足場設置料用架台の軽量化・仮設方法の見直し、自動塗装ロボットの開発などを進めてゆく。

(2) 補修機材・超耐久性材料の開発

維持修繕費の約半分を占める塗替え塗装費の縮減と環境負荷の低減を目指して開発した上塗り・中塗りを1層で塗布可能な省工程塗料を用い、塗替え塗装及び局部補修塗装を計画的に進める。また、更なる材料、機材の開発により、構造物の長期にわたる健全性や安全性を確保する。

(3) 塗膜劣化予測データの活用

塗膜の劣化状態を正確に把握し、適切な塗替え塗装時

期を判断するため、時間の経過や外部環境によって塗膜が劣化する過程を定量的かつ広範囲にわたって評価できる技術を開発し、得られたデータを活用することで、科学的根拠に基づいた合理的な塗替え塗装計画を策定する。

6. おわりに

瀬戸大橋をはじめとする長大橋は、全て海上部に位置しており、高所であること、海上からの飛来塩分が多いことなど、様々な厳しい環境条件下におかれている。今回、報告した瀬戸大橋の塗替え塗装工事は、「長大橋の長寿命化」を視野に入れた予防保全の先駆的な取組である。

2025年3月には、10年後のありたい姿を示す「JB本四高速グループビジョン2035」と、今後3年間の取組み方針をまとめた「中期経営計画2025-2027」を策定した。具体の取組み項目の一つとして「200年橋梁」への挑戦を掲げている。

「200年橋梁」を実現するために必要な塗替え塗装工事を含めた維持補修工事の実施にあたっては、本州四国連絡高速道路特有の作業環境、近接手段や作業時間など、様々な制約条件を考慮し、また長時間の通行止めを回避しなければならない。そのため、これまで蓄積された維持補修技術や知識を駆使しつつ工夫を凝らすとともに、ロボットやAIといった最先端技術も積極的に活用し、貴重なインフラを次世代へつなげていきたい。

参考文献

- 1) 真辺 保仁：瀬戸大橋塗替え塗装の現況，Structure Painting, Vol.37No.2, 技術報告, 2009.3
- 2) 長尾幸雄：本四連絡橋の塗替え塗装，本四技報, Vol.32, No.110, 2008.3

近赤外線ハイパースペクトル計測による 塗膜評価の実橋試験

Field Testing of Coating Evaluation on Actual Bridges using Near-Infrared Hyperspectral Measurement

馬谷 連太郎

Rentarou Umatani

長大橋技術部
技術推進課

田村 拓登

Hiroto Tamura

本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
(前)長大橋技術部
技術革新・アセットマネジメント課

河野 晴彦

Haruhiko Kono

長大橋技術部
技術推進課
担当課長

概要

本州と四国を跨ぐ海峡部長大橋（以下「本四連絡橋」という。）の外面塗装には、重防食塗装が採用されており、犠牲防食層及び下塗り層が損耗する前に塗替塗装を行う予防保全を基本としている。予防保全を行うために現在行っている調査・点検手法はいずれも橋梁塗膜に近接する必要があるため、また定点での評価となるため多大な労力と時間がかかる。そこで近赤外線分光法に着目し橋梁塗膜の全面を効率的に評価する手法について検討している。本稿では、実橋にて実施した近赤外線ハイパースペクトル計測（以下「近赤外線HS計測」という。）を用いた試験計測とその結果について報告する。

The long-span bridges connecting Honshu and Shikoku have been coated with heavy-duty anticorrosion coatings. Before the sacrificial corrosion layers and under layers are exposed, the repainting have been conducted based on the preventive maintenance policy. However, current inspections and survey methods for preventive maintenance require close visual inspections to the bridge coating and evaluate only at fixed points. As a result, a lot of work and time are needed. Therefore, we are investigating a method for efficiently evaluating the entire bridge coating using near-infrared spectroscopy. This paper reports on several methods and their results using near-infrared hyperspectral measurement (near-infrared HS measurement) on an actual bridge.

1. はじめに

本四連絡橋の外面塗装には、鋼材の腐食を防止するため、複数層からなる重防食塗装が採用されている。重防食塗装は、犠牲防食層、下塗り層、中塗り層、上塗り層の4層で構成され、それぞれが異なる機能を担っている。犠牲防食層は、亜鉛が犠牲陽極として作用することで鋼材の腐食を防止し、下塗り層はその保護層として水分や塩化物などの腐食促進因子の浸透を抑制する。中塗り層は下塗り層の保護と上塗り層との密着性向上を目的とし、上塗り層は紫外線などの外的要因から塗膜全体を保護する役割を果たす。

本四連絡橋における塗替方針は、現場での施工管理が困難な犠牲防食層を極力傷めないこととし、犠牲防食層の保護層である下塗り層に損耗が及ぶ前に塗替を実施する予防保全を基本としている。このため、目視による塗膜変状の早期発見と、緊急度に応じた塗替作業計画の立

案を目的とする「塗膜基本点検、塗膜評価点検」や、計測機器を用いて客観的かつ定量的に塗膜の状態を把握し、将来の劣化予測に基づく全面塗替計画の基礎資料を得る「塗膜詳細調査」が実施されている。しかし、これらの点検、調査はいずれも対象部位に近接して行う必要があり、定点での評価となるため、長大橋の塗膜の状態を広範囲にわたり把握するには多大な時間と労力を要する。そこで、橋梁全体の塗膜を効率的に評価する手法として、近赤外線分光法に着目した。近赤外線分光法は、対象物に照射された近赤外線領域の光の反射、吸収及び透過特性から化学構造に基づく成分同定を行う手法である¹⁾²⁾。

本稿では、近赤外線領域の反射、吸収及び透過に関する分光特性が未知である重防食塗装に対し、実橋にて実施した近赤外線HS計測の結果について報告する。

2. 近赤外線HS計測の概要

2.1 近赤外線カメラによる塗膜劣化検出原理⁴⁾

赤外線を物体に入射させたときの赤外線の反射、吸収及び透過は、物質の化学構造によって異なる。図-1に示すように上塗り層に照射される赤外線のエネルギーを E 、上塗り層の反射率、吸収率及び透過率をそれぞれ ρ_1 、 α_1 及び τ_1 、中塗り層の反射率及び吸収率をそれぞれ ρ_2 及び α_2 とし、中塗り層を透過する赤外線エネルギーを0とした場合には、塗膜からの赤外線反射強度 E_R は式 (1) で求められる。

$$E_R = \rho_1 E + \rho_2 (\tau_1 E) - \alpha_1 \{ \rho_2 (\tau_1 E) \} \quad (1)$$

上式に含まれる上塗り層の吸収率及び透過率は上塗り層の厚さに依存すると仮定できるため、エネルギー E_R は上塗り層の厚さに応じて変化すると考えられる。このような上塗り層の厚さによって変化する赤外線反射強度の関係を利用することで、塗膜の状態を定量的に評価することが可能になると考えられる。

2.2 近赤外線HS計測の原理⁵⁾

近赤外線HS計測では、図-2に示す2次元の位置情報 (x, y) とピクセルごとの波長情報 (λ) で構成される3次元の情報を持っているデータキューブを取得する。このデータキューブを解析することで、波長域ごとに赤外線エネルギー強度を示す強度画像を構成し、材料の特定の波長域における反射、吸収及び透過特性の差異を画像内で強調表示することができるため、塗膜の劣化を検出することができると考えられる。

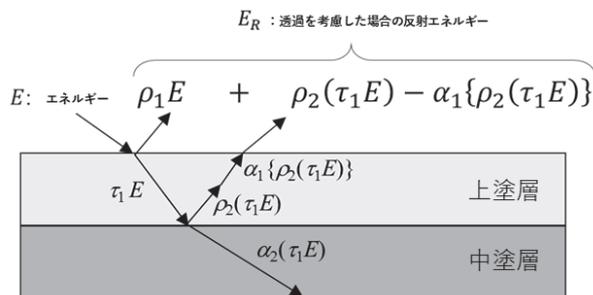


図-1 光の反射・吸収・透過

Fig.1 Reflection, absorption and transmission of light

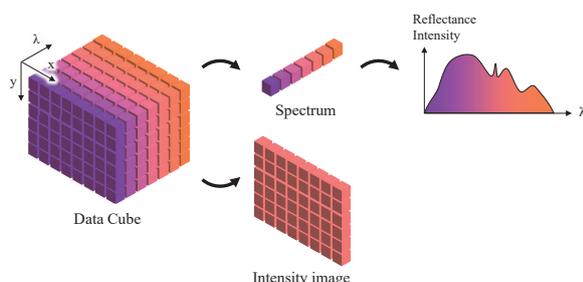


図-2 ハイパースペクトルデータキューブ

Fig.2 Hyperspectral data cube

2.3 計測装置の仕様

計測で使用した近赤外線ハイパースペクトルカメラは赤外線カメラと分光器で構成される。赤外線カメラ及び分光器の仕様を表-1、表-2それぞれに示す。近赤外線ハイパースペクトルカメラの外観を写真-1に示す。

表-1 赤外線カメラ (FLIR A6261) の仕様

Table 1 Specifications of infrared camera (FLIR A6261)

検出器	InGaAs
検出器応答	0.9~1.7 μm
解像度	640×512 ピクセル
フルフレームレート (フルウィンドウ)	0.0015~180 Hz
センサー冷却方式	単段TEクーラー
サイズ (L×W×H) / 重量	216 mm×102 mm×109 mm / 2.3kg

表-2 分光器 (SOL instruments SL100M) の仕様

Table 2 Specifications of spectrometer (SOL instruments SL100M)

光学システム	
光学設計	水平対称, 非点収差補正あり
F値	3.3
焦点距離	99.3mm
レンズ	色収差・歪み補正
焦点面	28 x 8 mm
グレーティングサイズ	40 x 40 x 6 mm
迷光	9 x 10 ⁴
非点収差補償光学系	
水平倍率	1.2
垂直倍率	1
垂直方向分解能	50 μm
サイズ・重量	
サイズ (L×W×H) / 重量	190 mm×175 mm×160 mm / 2kg



写真-1 近赤外線ハイパースペクトルカメラ

Photo 1 Near-infrared hyperspectral camera

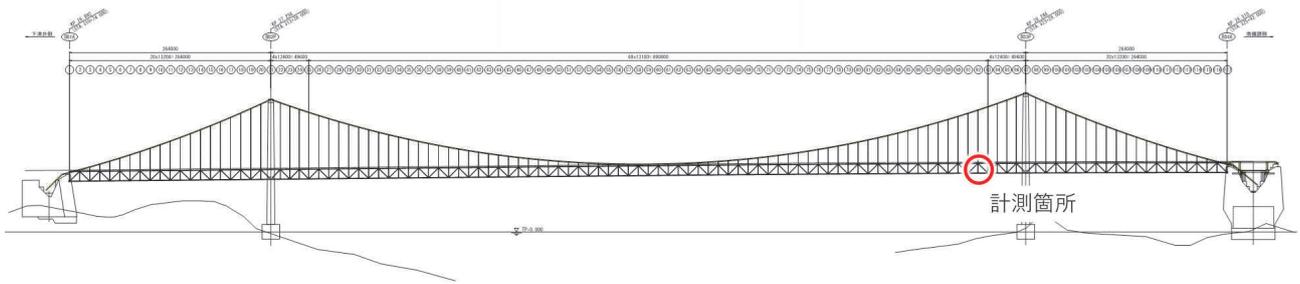


図-3 計測箇所（北備讃瀬戸大橋）
Fig.3 Measurement point (Kita Bisan-Seto Bridge)

3. 実橋における試験計測

近赤外線ハイパースペクトル計測システム（以下「計測システム」という。）を用いて、赤外線分光特性が未知の塗膜に対し、上塗り層の損耗による中塗り層露出部の検出が可能かを確認するため、定点位置での計測を行った。さらに、計測の効率化を図るため、短時間で広範囲を計測することを目的とした桁外面作業車（以下「作業車」という。）を用いた計測と、遠方から広範囲を計測することを目的とした遠望定点位置からの計測を行った。本章ではこれらの計測結果について報告する。

3.1 定点位置での計測

3.1.1 計測対象

計測対象は北備讃瀬戸大橋とし、計測箇所は図-3に示す格点93西側の補剛桁主構垂直材とした。この部材に施されている上塗り層はふっ素樹脂塗料であり、中塗り層及び下塗り層は、共にエポキシ樹脂塗料である。

3.1.2 計測方法

計測システムの設定条件を表-3に示す。また、計測時の実験機器セットアップを図-4に示す。計測対象面とハイパースペクトルカメラは正対させ、図-4に示すように両者の距離及びハイパースペクトルカメラの仰角は、中塗り層露出部が撮影範囲に収まるよう設定した。計測はアクティブ照明を照射しながら自動ステージ上300mmを移動し終えるまでの約2分間で行った。

3.1.3 計測結果

計測によって得られた可視画像、全波長の平均強度画像をそれぞれ図-5(a)と図-5(b)に示す。図-5(b)中の青色及び橙色で示した点はそれぞれ上塗り層健全部と中塗り層露出部であり、これらの点から取得したスペクトルを図-5(c)に示している。図-5(d)~(f)は、波長ごとの強度画像のうち、赤外線の大気への吸収の影響が小さい1,050nm、1,200nm、1,500nmの強度画像である。全波長の平均強度画像では、中塗り層露出部を明瞭に検出できていないのに対し、上塗り塗膜と中塗り塗膜の赤外線反射強度の違いが大きい1,200nmと1,500nmでは中塗り層露出部を良好なコントラストで明瞭に検出できていることが分かる。また、図-5(c)の上塗り塗膜と中塗り塗膜

表-3 近赤外線ハイパースペクトル計測システムの設定条件

Table 3 Experimental conditions of near-infrared hyperspectral measurement system

近赤外線カメラ	
積分時間	200ms
フレームレート	5Hz
焦点距離	25mm
絞り値	4.0
分光器	
スリット幅	80μm
中心波長	1340nm
自動ステージ	
加速/減速時間	150mm/min

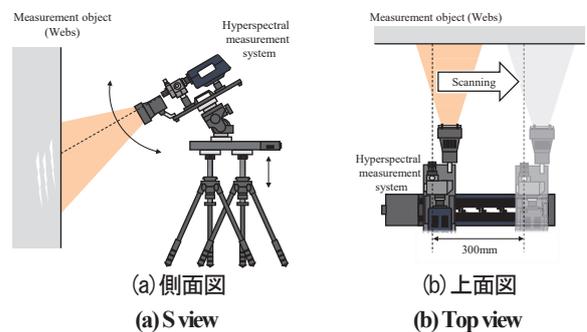


図-4 計測での実験機器のセットアップ
Fig.4 Setup of experimental device in field study

のスペクトルの比較では、1,300nm程度を境に上塗り塗膜と中塗り塗膜の赤外線反射強度が逆転する傾向がみられる。波長別の強度画像を見ても、1,050nmや1,200nmに対して1,500nmでは上塗り塗膜と中塗り塗膜の露出箇所の強度が逆転していることが分かる。以上から塗料ごとの赤外線分光特性が未知の塗膜に対しても、中塗り層露出部の検出に最適な計測波長域をその場で見つけることができることが分かった。また、赤外線反射強度の違いが大きい波長の強度画像を比較することで目視では困難な中塗り層露出部の検出が可能であることが分かった。

3.1.4 計測データの解析処理

計測データに対し、中塗り層露出部をより強調する解析処理が可能であるかの検証を行った。解析の方法は、

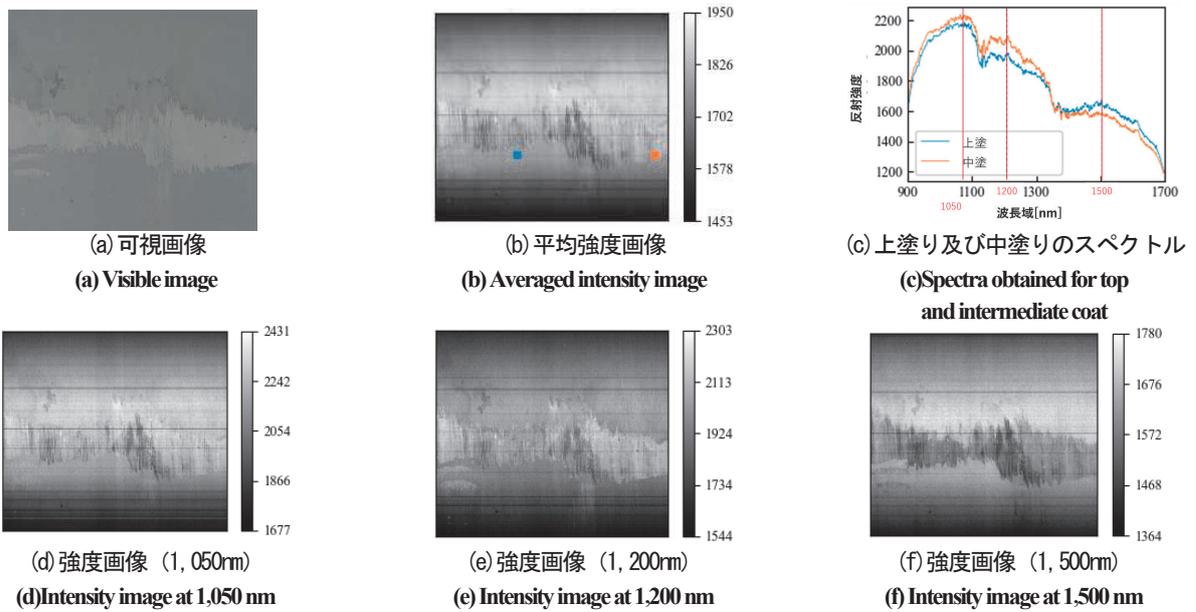


図-5 計測結果
Fig.5 Test results

計測で得られたデータキューブに対し、前処理として平滑化処理と散乱光補正を行い、多変量解析の探索的手法である主成分解析 (PCA) を実施した⁶⁾。

解析後の画像を図-6に示す。画像は、測定結果の1,050nm (図-5(d)) や1,200nm (図-5(e)) の画像より中塗り層露出部が白く、上塗り層健全部が濃く強調されていることが分かる。以上から、計測で得られたデータキューブに対し、解析処理を実施することで中塗り層露出部をより明瞭に表示できることが分かった。

3.2 作業車を用いた計測

前章の北備讃瀬戸大橋での近赤外線HS計測では、自動ステージ上の計測システムを動かすことによりデータキューブの取得を行ったが、本章では一定速度で移動可能な作業車上に計測システムを設置することでデータキューブの取得ができるか検証を行った。また、上塗り層の種類が異なる場合でも中塗り層露出部の検出が可能かを確認するため、上塗り層がポリウレタン樹脂塗料である大島大橋と、上塗り層がふっ素樹脂塗料である因島大橋で計測を行った。

3.2.1 大島大橋での作業車計測

(1) 計測対象及び計測方法

大島大橋の計測箇所は、図-7に示す中央径間中央付近の箱桁下面である。本計測では、作業車を用いた計測を行った場合でも、自動ステージを使った定点計測と同様の結果が得られるかを確認した。比較ケースは、自動ステージを停止させ、アクティブ照明を照射し、作業車を10m/minで移動させながら計測するケースAと、作業車を停止させ、アクティブ照明を照射し、自動ステージを150mm/minで移動させながら計測するケースBとし、計測結果の比較を行った。なお、この部材に施されてい

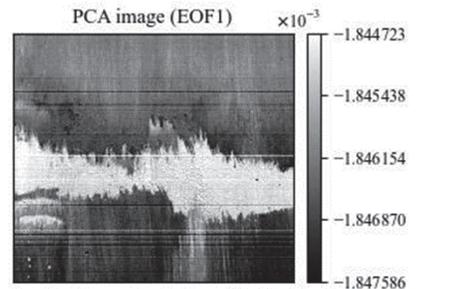


図-6 PCAによる防食塗膜の劣化部位の検出結果
Fig.6 Detection result using PCA of coating degradation

る上塗り層はポリウレタン樹脂塗料であり、中塗り層および下塗り層については、ともにエポキシ樹脂塗料である。

(2) 計測結果

作業車を移動させながら計測したケースAの計測結果を図-8に、作業車を停止させ自動ステージを移動させながら計測したケースBの計測結果を図-9に示す。それぞれの計測によって得られた全波長の平均強度画像を図-8(a)および図-9(a)に示す。図-8(a)および図-9(a)中の青色および橙色に示した点はそれぞれ上塗り層健全部と中塗り層露出部であり、これらの点から取得したスペクトルを図-8(b)および図-9(b)に示す。

ケースAとケースBの結果を比較すると、ケースAのスペクトル波形に若干ノイズがあるものの、全波長の平均強度画像及びスペクトルとも遜色なく測定できたことが分かる。すなわち、自動ステージの代わりに作業車上に計測システムを固定し、一定速度で計測することで、自動ステージを使った定点計測と同様の結果が得られることが分かった。

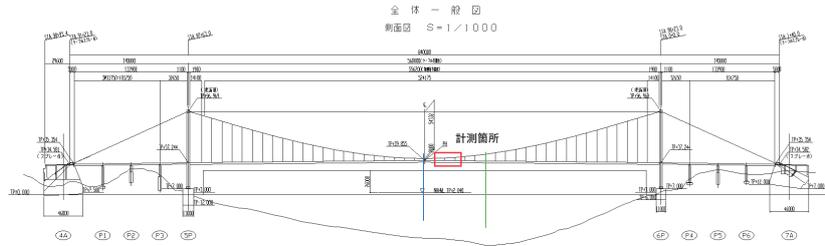
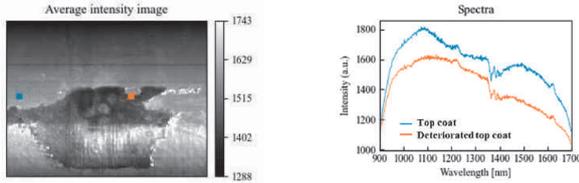
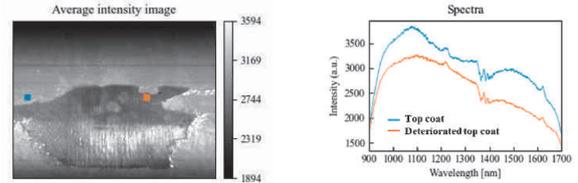


図-7 計測箇所 (大島大橋)
Fig.7 Measurement point (Ohshima Bridge)



(a) 平均強度画像
(a) Average intensity image
(b) 上塗り及び中塗りのスペクトル
(b) Spectra obtained for top and intermediate coat

図-8 ケース A (作業車を移動させながらの計測)
Fig.8 Case A (Results obtained while moving the work vehicle)



(a) 平均強度画像
(a) Average intensity image
(b) 上塗り及び中塗りのスペクトル
(b) Spectra obtained for top and intermediate coat

図-9 ケース B (自動ステージを移動させながらの計測結果)
Fig.9 Case B (Results of measurements conducted during the movement of the automated stage)

因島大橋

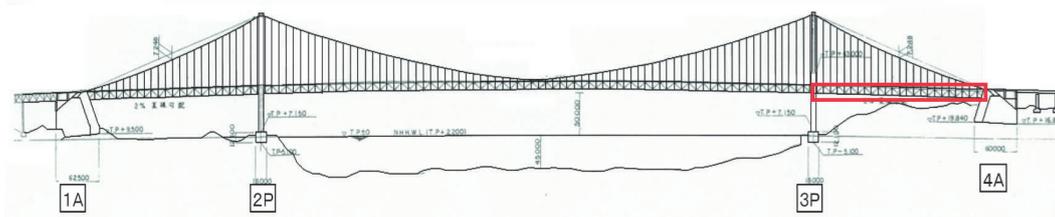


図-10 計測箇所 (因島大橋)
Fig.10 Measurement point (Innoshima Bridge)

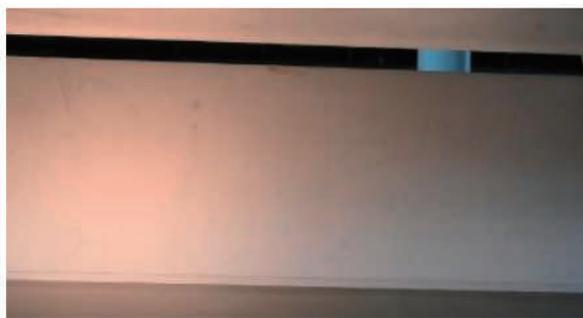


写真-2 中塗り層露出が分からない区間
Photo 2 Area of visually undetecting intermediate coat



写真-3 中塗り層露出が確認可能な区間
Photo 3 Area of visually detecting intermediate coat

3.2.2 因島大橋での作業車計測

(1) 計測対象及び計測方法

因島大橋での計測箇所は、図-10に示す3P-4A側径間の主構下弦材の側面である。この間の計測対象面は、写真-2や写真-3に示すように中塗り層露出部分分からない区間や確認可能な区間が混在している。計測は、作業

車上に計測システムを固定してアクティブ照明を照射し、作業車を10m/minで移動させながら約18分間行った。なお、この部材に施されている上塗り層はふつ素樹脂塗料であり、中塗り層及び下塗り層については、ともにエポキシ樹脂塗料である。

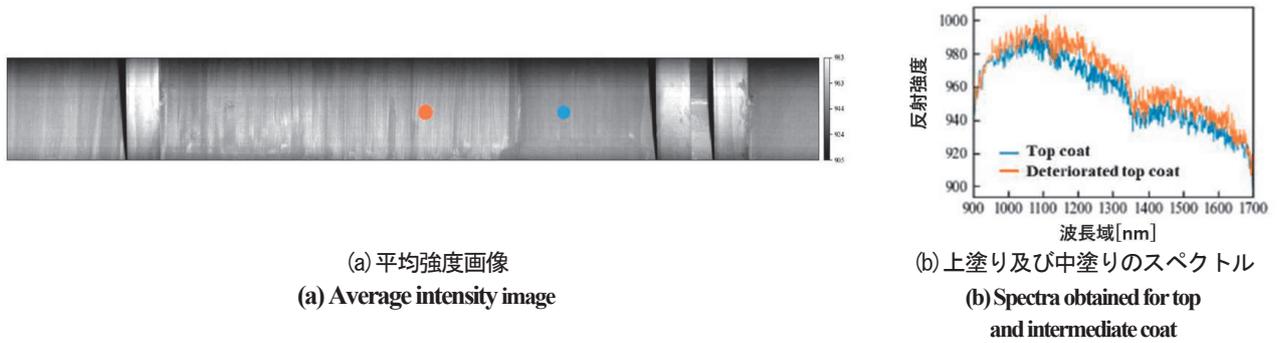


図-11 計測結果
Fig.11 Test results

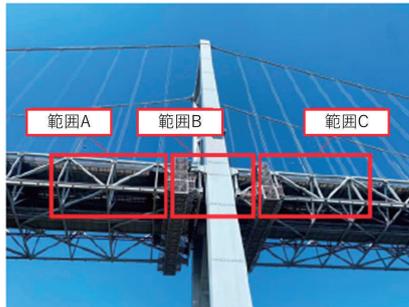


図-12 計測範囲
Fig.12 Test areas

表-4 近赤外線ハイパースペクトル計測システムの設定条件

Table 4 Setting conditions of near-infrared HS measurement system

近赤外線カメラ	
積分時間	200ms
フレームレート	50Hz
レンズの焦点距離	25mm
絞り値	4.0
分光器	
スリット幅	80 μ m
中心波長	1,340nm
自動回転ステージ	
回転速度	0.25度/秒

(2) 計測結果

計測によって得られた全波長の平均強度画像を図-11(a)に示す。図-11(a)中の青色及び橙色で示した点はそれぞれ上塗り層健全部と中塗り層露出部であり、これらの点から取得したスペクトルを図-11(b)に示す。上塗り塗膜は中塗り塗膜と比較して全波長で反射強度が高いことが分かる。スペクトル波形では、ノイズと思われるものが確認できるが、上塗り塗膜と中塗り塗膜の違いを区分できるものと考えている。つまり作業車移動による連続計測により効率的な塗膜劣化検出が可能であることが分かった。

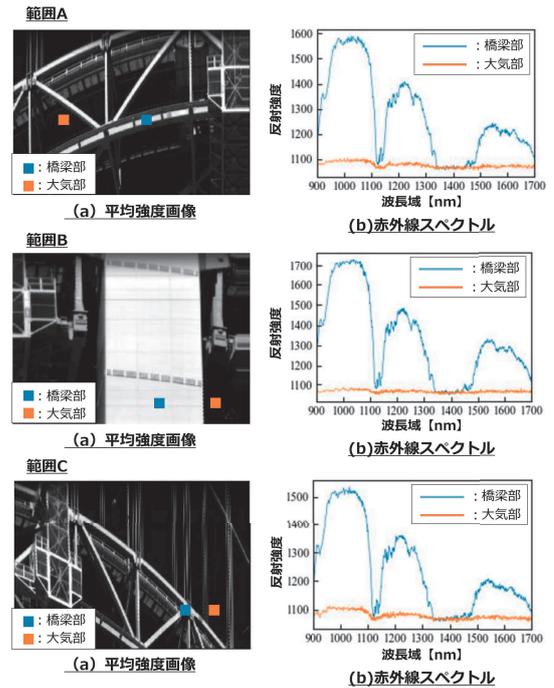


図-13 計測結果
Fig.13 Test results

3.3 遠望定点位置での計測

3.3.1 計測対象

計測対象は因島大橋とし、計測箇所は図-12に示す3P主塔南側面及び補剛桁南側面とした。図-12の赤色の四角で示した範囲は、3回の計測で撮影した範囲を示し、それぞれ範囲A、範囲B、範囲Cとした。この部材に施されている上塗り層はふっ素樹脂塗料であり、中塗り層及び下塗り層については、ともにエポキシ樹脂塗料である。

3.3.2 計測方法

本計測はアクティブ照明を使用せず、太陽光を光源とするパッシブ計測で行った。計測時間は計測対象に太陽光がよく当たる時間である、9月の10時から17時に計測を行った。計測位置から計測対象までの距離は約80mであり、計測時は自動回転ステージを一定の角速度で回転させ、計測を行った。本計測での計測システムの設定条件を表-4に示す。

3.3.3 計測結果

計測によって得られた結果を図-13に示す。図-13の左側(a)は各計測範囲における全波長の平均強度画像である。図-13(a)中の青色で示した点は橋梁部材を示し、橙色で示した点は大気を示す。これらの点から取得した橋梁部材及び大気のスペクトルを図-13の右側

(b)に示す。全波長の平均強度画像では、橋梁部材の南側面が細部まで明瞭に強調されており、主塔添接部のボルト部分などの細かい部分まで確認することができる。しかしいずれの範囲においても中塗り層の露出を検出することはできなかった。中塗り層の露出を検出できなかった要因として、計測画像中の橋梁部材の寸法が小さ過ぎることが考えられる。図-13(b)群に示す赤外線スペクトルでは、大気部のスペクトルに比べ橋梁部材のスペクトルの強度が非常に大きくなっていることが分かる。なお、1,130nm付近及び1,350~1,480nm付近で橋梁部材からのスペクトル強度が小さくなっていることが分かる。これは大気による近赤外線の吸収が原因だと考えられる⁷⁾。

4. まとめ

本稿では、橋梁全体の塗膜を効率的に評価することを目的として行った、近赤外線HS計測を用いた実橋での計測について述べた。これにより得られた成果を以下に示す。

- ① 北備讃瀬戸大橋での定点位置での試験計測では、近赤外線HS計測を行うことで、赤外線分光特性が未知の塗膜に対しても、中塗り層露出部の検出に最適な計測波長域をその場で見つけることができ、赤外線反射強度の大きい波長のデータを比較することで中塗り層露出部を検出できることが分かった。また、計測によって得られたデータに対し、解析処理を実施することで、中塗り層露出部をより強調して表示することができ、より明瞭に中塗り層露出部を検出できることが分かった。
- ② 大島大橋及び因島大橋での作業車を用いた計測では、自動ステージの代わりに作業車上に計測システムを固定し、一定速度で計測することで、自動ステージを使った定点計測と同様の結果が得られることが分かり、効率的な塗膜劣化検出が可能であることが分かった。また、上塗り層がポリウレタン樹脂塗料である大島大橋での計測と、上塗り層がふっ素樹脂塗料である因島大橋での計測では、どちらも中塗り層露出部を検出することができ、上塗り層の種類が異なる場合でも、中塗り層露出部を検出できることが分かった。
- ③ 因島大橋での遠望定点位置からの試験計測では広範囲にわたり橋梁部材を明確に強調することができたが、中塗り層の露出を検出することはできなかった。

要因としては計測画像中の橋梁部材の寸法が小さ過ぎることが考えられるため、今後はより焦点距離の大きいレンズを使用して実橋で計測をおこない、中塗り層の露出を検出するために必要な望遠性能について検討を行う。

5. 終わりに

今後は、本四連絡橋における塗膜の維持管理を、より合理的かつ効率的に行うために、塗膜評価手法のさらなる高度化に向けた検討を継続していく予定である。

謝辞

本稿は本四高速と国立大学法人神戸大学、国立大学法人広島大学との共同研究の成果を取りまとめたものである。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 阪上隆英, 塩澤大輝, 松本悠希, 溝上善昭, 林昌弘, 奥村淳弘: 近赤外線分光情報を用いた塗膜劣化評価法の提案, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第73回, I-026, 2018
- 2) 溝上善昭, 林昌弘, 奥村淳弘, 阪上隆英, 塩澤大輝, 松本悠希: 赤外線カメラを用いた塗膜劣化評価による実橋調査, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第73回, I-027, 2018
- 3) 松本悠希, 阪上隆英, 塩澤大輝, 溝上善昭, 林昌弘, 奥村淳弘: 近赤外線カメラを用いた重防食塗装最表層の損耗度定量評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第73回, I028, 2018
- 4) 岸上俊介, 林昌弘, 有馬敬育, 阪上隆英, 塩澤大輝, 梶房祥子, 松本悠希, 春日裕貴: アクティブ近赤外線計測による防食塗装膜の劣化評価法の開発, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第75回, VI-564, 2020
- 5) 谷徳, 阪上隆英, 塩澤大輝, 小川裕樹, 春名進佑, 横井芳輝, 杉山剛史: ハイパースペクトル計測による重防食塗装の劣化評価, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第79回, VI-586, 2024
- 6) 春名進佑, 小川裕樹, 坂田巧, 塩澤大輝, 阪上隆英, 横井芳輝, 杉山剛史: ハイパースペクトル赤外線計測に基づく非破壊検査, 2023年度非破壊検査総合シンポジウム, 2023
- 7) 赤外線技術研究会: 赤外線工学—基礎と応用—, オーム社, 1991

スマートフォンによるケーブル張力測定システム (テンションリーダー)の開発

Development of 'Tension Reader': smartphone-based system for cable tension measurement

朝見 之哉 Yukiya Asami 二宮 仁司 Hitoshi Ninomiya 伊藤 進一郎 Shinichiro Ito

本四高速ブリッジエンジニアリング 垂水点検管理室
(前 技術事業本部 技術開発部)

本四高速ブリッジエンジニアリング 技術事業本部
事業調整部長

本四高速ブリッジエンジニアリング 技術事業本部
技術開発部 担当部長

概要

吊橋のハンガーロープや斜張橋のケーブル（以下、「ケーブル」という）の張力は、点検管理要領（長大橋梁点検）において、精密点検時に測定することが規定されている。現在、ケーブル張力測定は通常、振動法で行っている。これに使用するポータブルFFTアナライザ（以下、「FFTアナライザ」という）は、高精度ではあるものの、重量があることや別途加速度センサーなどを接続する作業が必要なことから測定作業の効率が悪く、また価格も比較的高価であることが課題であった。これらを解決するため、計測及び解析を1台のスマートフォンで振動計測を行う方法を考案した。現在も実橋の種々のケーブル張力測定作業に使いFFTアナライザによる測定値と比較するとともに解析アプリの改良を行っている。本文では、振動法による張力の測定方法、これまでの取組、現状の課題と対策について報告する。

The tension of hanger ropes in suspension bridges and cables in cable-stayed bridges is required to be measured during a detailed inspection as stipulated in the Inspection and Maintenance Manual for Long-Span Bridges.

A portable FFT analyzer has been used up to now for cable tension measurement provides high accuracy; however, it is heavy, requires to connect sensors, and is more costly, resulting in low operational efficiency. To address these issues, we have devised a method for cable tension measurement by vibration using a smartphone and have been improved it through field measurements on actual bridges. This paper reports on the method for cable tension measurement by vibration, past efforts, current problems, and corresponding countermeasures.

1. 振動法によるケーブル張力測定

ケーブル張力測定は、吊橋のハンガーロープや斜張橋ケーブルの健全性を評価するために不可欠な計測及び解析の一つである。

ケーブル張力測定における振動法は、現場で張力を推定する代表的な手法である。ケーブルに外力（変位）を加えるなどして、その自由振動の周波数分析から固有振動数を算出し、理論式（張力と曲げ剛性を考慮した振動数方程式の解である、モード次数 i と振動数 f の関係式¹⁾）を用いて張力を求める。

振動法による張力測定は、張力値そのものではなく、単位長さ当たり質量、曲げ剛性、支持条件が影響するため、絶対的な張力を求めることは難しく、経年的な変化を捉えるための定期的なモニタリングと位置付けられる。そのため、測定点の位置やセンサーの取り付け角度な

ど、測定条件を可能な限り同一にすることが求められ、これにより、過去の測定データとの比較が可能となり、ケーブルの張力変化を正確に把握することができる。

2. FFTアナライザによる振動加速度測定と張力算出法

ここでは現在のFFTアナライザを用いた振動加速度測定法と張力算出法について述べる（写真-1, 2）。

2.1 使用機器

ケーブル張力測定に使用している計測機器類を写真-3に示す。過去にはFFTアナライザを所有していたが、維持費用がかかることから、更新せず現在はリース機を使っている（1か月約30万円）。使用方法は本体と信号ケーブルで接続した加速度センサーをケーブルの計測箇所に取り付けて測定を行う（写真-4）。



写真-1 FFTによる測定状況(遠景)

Photo 1 Distant View of FFT Analyzer Measurement Scene



写真-2 FFTアナライザによる測定状況(近景)

Photo 2 Close-Up View of FFT Analyzer Measurement Scene



写真-3 現在使用している計測機器

Photo 3 Measurement devices currently in use



写真-4 加速度センサーの取り付け状況

Photo 4 Mounting of Acceleration Sensor

2.2 現場での振動計測作業

通常、加速度センサーの設置位置は、取付けが楽なケーブル定着部から1.5m程度の高さだが（立位による打撃高さの目安）、カバーなどによりケーブル本体に取り付けられない場合は、ケーブルの露出する一番低い位置に設置して計測を行う。交通振動などによる常時微動の計測及びハンマーによる打撃などで加振した振動の計測の2種類の方法で行い、スペクトル波形のピークが読み取り易い方の測定結果を採用する。これまでの実績から加振による振動計測の方が読み取り易いケースが多い。

2.3 固有振動数の求め方

後述するケーブル張力の算出には、モード次数とそれに対する固有振動数が必要となる。ここではこれを探し出す手順について説明する。計測した自由振動の加速度時刻歴波形（図-1）をFFT計算し、パワースペクトルを求める。この波形のある程度一定間隔で現れるピークの振動数を読み取り、この振動数に対するモード次数を決める（図-2）。この作業をピークサーチというが、必ずしも1次モードから順に現れるわけではなく、現時点では目視読み取りと、過去に計測した固有振動数を基に、人が選定している。

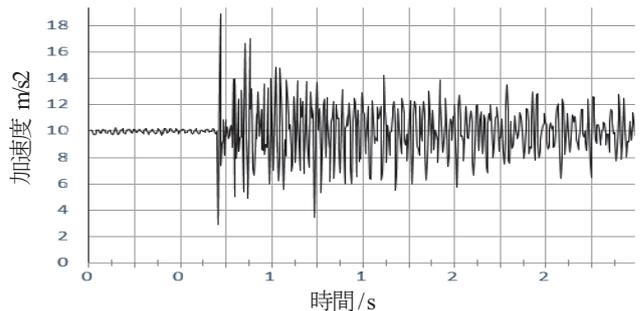


図-1 時刻歴波形図

Fig 1 Time History Acceleration

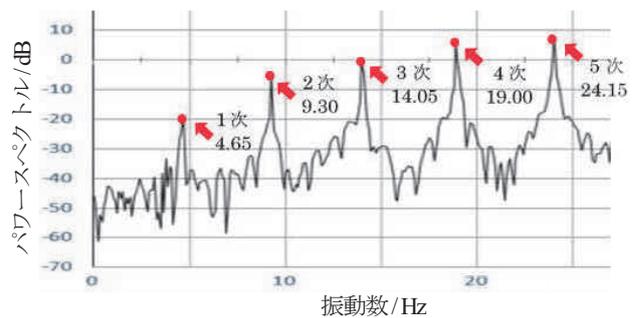


図-2 パワースペクトル

Figure 2 Power Spectrum

2.4 張力算出に用いる算定式

吊橋のハンガーロープや斜張橋ケーブルのように張力が導入された線材の振動数方程式の解は、山極らが示し

たモード次数とその固有振動数の関係式^{1), 2)}があり、張力算定にはこれを適用する。なお、ケーブル両端の境界条件は両端単純支持、両端完全固定の2種類が示されている (図-3, 4)。



図-3 両端単純支持
Fig 3 Simply Supported



図-4 両端完全固定
Fig 4 Fully Fixed

(1) 両端単純支持

両端単純支持の境界条件の場合は式(1)を適用する。実測で得られた複数の固有振動数の2乗値と、モード次数の2乗値の関係をプロットし、最小二乗法を用いて近似した式(1)の係数項の値を求める。この i^2 の2次関数から張力を算定することができる (図-5)。

$$f_i^2 = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} i^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} i^2 \quad (1)$$

f : 固有振動数 EI : 曲げ剛性 ρ : 密度
 A : 断面積 T : 張力 L : ケーブル長

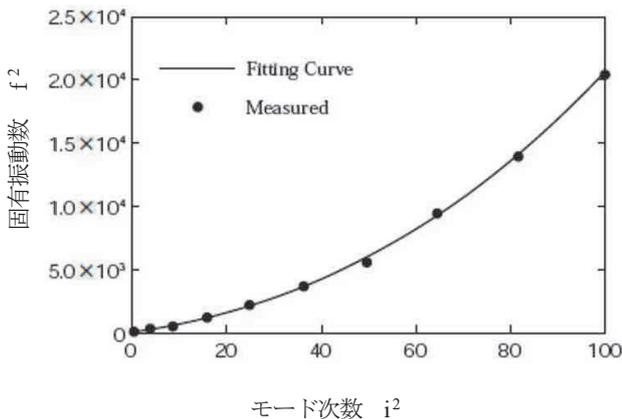


図-5 固有振動数のカーブフィット²⁾
Fig 5 Least-squares Fitting for Natural Frequencies

(2) 両端完全固定

両端完全固定の境界条件の場合は式(2)を適用する。この式(2)は、式(1)と違い、曲げ剛性 EI と張力 T の関数である ϕ/π が含まれているため、収束計算が必要となる。まず、式(1)から求めた曲げ剛性と張力を初期値とする。次にその値から式(3)で計算した ϕ の値を式(2)の ϕ/π に代入し、同じく最小二乗法を用いて曲げ剛性と張力を計算する。この式(2)、式(3)の計算を曲げ剛性と張力が収束するまで繰り返す。

$$f_i^2 = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} \left(i - \frac{\phi}{\pi}\right)^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} \left(i - \frac{\phi}{\pi}\right)^2 \quad (2)$$

$$\tan \phi = -\frac{4\pi f}{T} \sqrt{\rho AEI} \quad (3)$$

2.5 張力算定アプリ

現場で計測した振動加速度のFFTから得たモード次数 i と固有振動数 f のセットを基に、2種類の境界条件に対してPCで簡単に張力算定を行うことを目的にアプリを開発した。選定したモード次数のピークの周波数、ケーブルの長さ、単位重量(1m当たりの重量)をアプリに入力することで張力を算出することができる。



図-6 ケーブル張力算定アプリの表示例

Fig 6 Example Display of Cable Tension Calculation App

3. FFTアナライザでの測定の課題とスマートフォンの可能性

3.1 FFTアナライザによる張力測定の課題

本四高速ブリッジエンジニアリング(株)では、2006年度より(株)神戸製鋼所が開発した測定方法³⁾を導入し、生口橋でケーブル張力の実測訓練をスタートさせた。これはFFTアナライザを使用し、比較的小規模な機材構成で計測できる手法として導入したものであり、2006年に(株)神戸製鋼所より「張力のかかっているケーブルの曲げ剛性及び張力の測定方法」の特許権⁴⁾及びノウハウの使用許諾を得ている。FFTアナライザにおける張力測定の課題は表-1のとおりである。

表-1 FFTアナライザによる張力測定の課題

Table 1 Problems of FFT analyzer measurement

(1) コスト	測定機器 (FFTアナライザ) のリース費用が高額 (1か月30万円) となうえ、加速度センサー購入・校正などの維持費がかかる
(2) 機器設置の簡便性	FFTアナライザ本体が大きく、加速度センサーと接続信号線の取り回しに時間がかかるなど計測場所を変える都度の作業が簡便でない
(3) 操作性	FFTアナライザの操作は習熟が必要であり、測定者が未経験者に代わる度、習熟訓練が必要
(4) 合理化	現場での計測作業と内業での解析作業があるため張力算出に時間がかかる

3.2 スマートフォンによるケーブル張力測定法の開発

前節の課題を解決するため2012年度から、より簡易な計測手法としてスマートフォン(iPhone)を用いたケーブル張力測定手法の開発を進めてきた。

スマートフォンに内蔵される加速度センサーとCPUを使用して振動加速度の計測と同時にFFT計算を行い、そのデータを通信機能を使い、クラウド経由で計測データをPCに送り張力解析を行うことを目標として取組み⁵⁾、測定機器を小型かつ安価で操作が簡単なスマートフォンに変更することで課題(表-1)のうち(1)、(2)、(3)を解決することができた。(4)については、パワースペクトルに現れるピークの振動数を表示するピークサーチ機能があったが、これに対応するモード次数を求めることができなかつた。このため2017年度からモード次数推定機能の検討を行い、2018年度に実装した。しかし、実橋測定ではエラーが多発していた。

一方、スマートフォン(iPhone)を用いて開発を進めていくなかで、外販に制限がある点など、実用化に対し様々な課題が出てきたことから、2021年度に維持費が少額かつ他社への販売に制限のないAndroidに機種変更し、アプリの移植を行った。しかし、次数推定機能の移植は見送った。

結局、これまでのシステムでは人がピーク波形をグラフから読み取る作業(ピークサーチ)を行っており、人の判断による固有振動数のばらつきが生じる可能性があった。

4. スマートフォンだけでケーブル張力算出を行うための課題解決策検討

4.1 ピークサーチ・次数推定の自動化の問題点

前項で課題としたピークサーチについて自動化を行うため理論的にピークを取得する方法を検討した。最初に検討した方法としては、理論式から導き出されるモード次数と振動数の関係は2次関数となることから、最小二乗法による適合曲線との相関係数の最も高くなる実測値を求めれば、必要とするデータが得られると考えた。しかし、試験の結果、以下の問題点を確認した。

- 1) ピークサーチは判定値(過去の記録などから判定した固有振動数)にはないピークを検出
- 2) 特に低次モードのピークが未検出となる場合がある(加速度が大きい周波数帯が高次側に偏在するため)
- 3) 次数推定の組み合わせケース数が多く計算時間が長い
- 4) 次数推定において決定係数 R^2 が高くて精度が悪いことがある。

図-7は大島大橋のハンガーロープ(ロープ長約15m)についてモードを1~11次から4個選び、ピークサーチについて振幅上位30個から4個選びその組み合わせについて試算したもののなかから決定係数 R^2 の最上位のケースをプロットしたものである。

このケースでは精度がよいが計算時間は70秒かかった。全部で27ケースについて試算したが、計算時間は最小70秒、最大342秒あった。スマートフォンではこの1.4倍時間がかかると予想される。

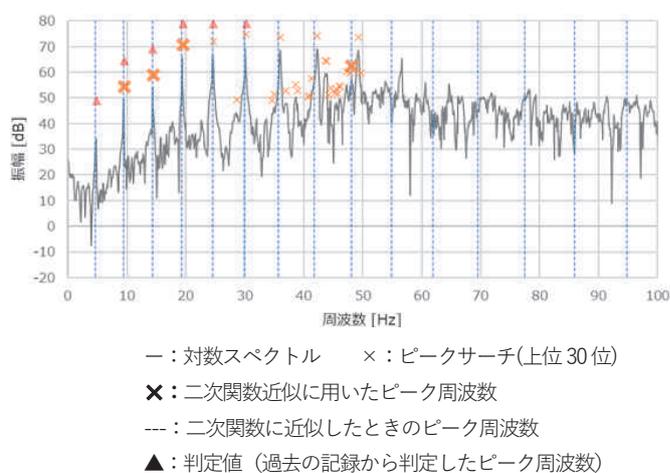


図-7 次数推定結果におけるピーク周波数の例
Fig 7 Example of peak frequency in the estimation results of mode number

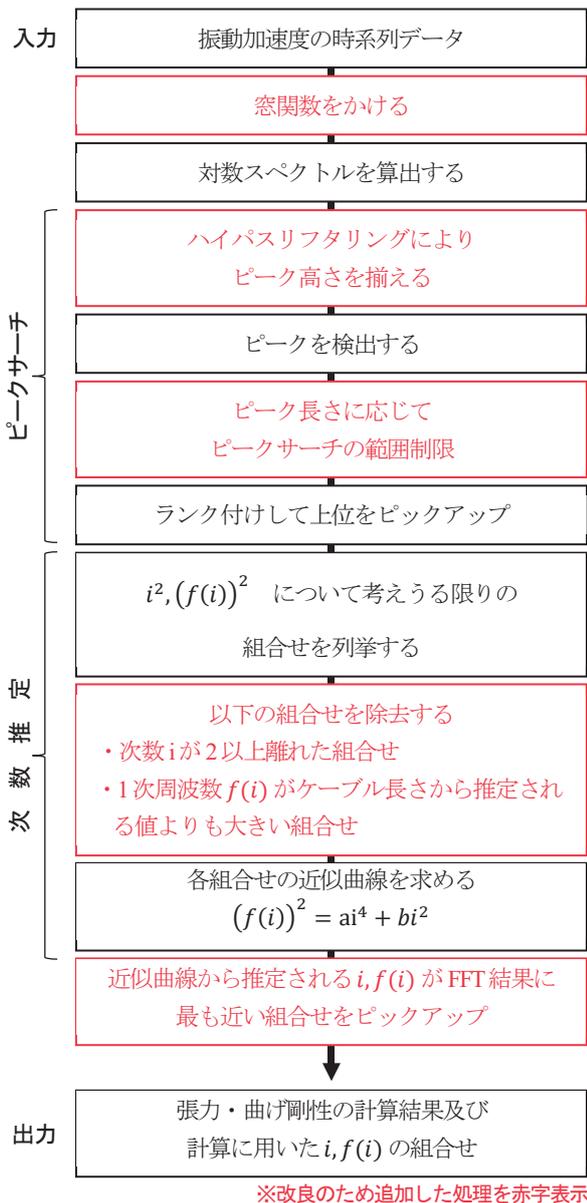
4.2 データ処理による解決策の検証

これらの解決策として1次、2次モード振動が大きくなるような箇所(ケーブルの中央、あるいはL/4)を加振するのが原理的に簡単だが長いケーブルでは現実的でなく、低次モードの小さなピークをいかに抽出するかが技術的な課題となる。

つまり、長いケーブルの端部に近い点で加振、計測しても、データ処理技術で、有効なピークサーチと次数推定を行う方法を検討した。低次モードでの加速度ピーク値が小さいためFFT結果に対して更にいFFT計算(ケプストラム)したものにハイパスフィルターをかけた(リフタリング)後、FFT計算を行うことにより、スペクトルピークのレベル化(低次のもち上げ)ができることがわかった。低次モードが選定されやすくなり、ピークサーチの上位10位で次数推定に十分であることを確認した。また、4つ以上の点を得られるよう $i=4$ 以上の固有振動数を含む範囲として、ケーブル長さに応じてピークサーチの上限周波数を10次モードの概算振動数に制限して確認した(図-8)。

また、前節の試算組み合わせ数が多いため計算時間が長くなる点については、次数選定を2つ飛ばし以上で選ばないこととし、ピークサーチの選点数も上位30位から上位10位に減らすことで組み合わせ数が大幅に減り、計算時間が1000分に1程度に短縮することを確認した。

これらの有効な対策をデータ処理のフローに加えたWindows用アプリを制作した。



※改良のため追加した処理を赤字表示

図-8 データ処理の改良

Fig 8 Improved data processing methods

4.3 今後の展望

表-1(4)の課題を解決するためには、前述のデータ処理を行うアプリをスマートフォンに実装する必要があり、引き続きスマートフォンアプリを改良している。アプリに張力表示機能を追加する他、詳細の試算比較表（推奨ケースと他の計算ケースを表示）を見て、推奨以外を選ぶことができる機能も付加する予定である。これは、機器使用者に対する計算結果の見える化と、今後の検証用機能として搭載する。このアプリを使って、実橋のケーブル（ロープ）の張力測定（スマートフォンと加速度センサ+FFTアナライザの比較）による事例検証を重ねて信頼性を確立したいと考えている。

4.4 外販計画

2022年度に開発したスマートフォン(Android)によるケーブル張力測定手法は、2023年11月より先行して、加速度計表示とパワースペクトル表示が手軽に行える計測装置として本四以外の橋梁を対象とした外販を開始している。外販は以下の2種類の方法で実施している。

- (1) HBEによるコンサルタント業務として、計測一式を受注する。（計測結果保証，調査時期要調整）
- (2) スマホのレンタル（解析アプリ貸与，測定は各自。計測方法などのアドバイス有）

本四高速の吊橋・斜張橋のほか、2024年度には地方公共団体が管理する小規模な斜張橋のケーブル張力測定を実施している。

5. まとめ

スマートフォンを使用した張力測定では、従来の測定機器使用時と比べ、機器操作が簡易になり、また小型の機器1台になったことで落下対策などのストレスや安全対策を軽減できるなど、作業効率を大幅に向上させることができた（表-2，写真-5）。

今後、張力算出まで行えるアプリをスマートフォンに実装し、それを実橋で検証し続けていくことにより、スマートフォンを1台を現場に持っていきただけで誰でも簡単にケーブル張力を測定できるシステムを提供できると考えている。

表-2 FFTとスマホの比較

Table 2 Comparison between FFT and smartphone

張力測定機器	FFT+加速度センサ	スマートフォン
機器操作	機能が多く操作に練度が必要	操作が簡単
サイズ	328×88×246 (縦×横×幅mm)	118×62×12 (縦×横×幅mm)
重さ	本体のみで5kg	本体と固定治具合わせて0.2kg
コスト	リース費用 約30万円/月	本体価格約5万円※ 1
現場作業員 (作業員のみ)	2人	1人
作業時間	現場作業15分 +内業5分/1本 (櫃石島橋, 岩黒島橋 176本のケーブルを測定するのに現場作業2週間+内業3日)	現場作業10分/1本 (櫃石島橋, 岩黒島橋 176本のケーブルを測定するのに現場作業1週間)

※1 検討費用を除く



写真-5(1) スマートフォンによる計測状況 (大島大橋)
Photo 5(1) Frequency measurement using a smartphone
(Ohshima Br.)



写真-5(2) スマートフォンによる計測状況 (岩黒島橋)
Photo 5(2) Frequency measurement using a smartphone
(Iwakurojima Br.)

参考文献

- 1) 山極伊知郎 宇津野秀夫 遠藤浩司 杉井謙一：日本機械学会論文集 66巻 649号(2000-9) 高次の固有振動数を利用した線材の張力と曲げ剛性の同定法
- 2) 山極伊知郎 宇津野秀夫 杉井謙一 本田祐嗣：神戸製鋼技報 Vol.49 No.2 (Sep 1999) ケーブル張力と曲げ剛性の同時推定法
- 3) 田中慎司：第 6 回業務発表会 2007 年 打撃法によるケーブル張力測定
- 4) 特許第 3313028 号
- 5) 井島寄富：第 12 回業務発表会 2013 年 張力測定方法の改善

IoTデバイスを活用した ケーブル送気乾燥監視システムの開発

Development of cable dry air injection monitoring system utilizing IoT devices

外 和也 Kazuya Soto 米澤 篤志 Atsushi Yonezawa 溝上 善昭 Yoshiaki Mizokami

本四高速道路ブリッジエンジニアリング
技術事業本部 診断部

本四高速道路ブリッジエンジニアリング
技術事業本部 技術1課

本州四国連絡橋高速道路 長大橋技術部技術
推進課 課長
(前 本四高速道路ブリッジエンジニアリング
技術事業本部 調整部長)

概要

吊橋の主ケーブルには、素線の防食のため乾燥空気を送風する「ケーブル送気乾燥システム」が導入されている。このシステムによる主ケーブル防食の実効性を確保するためには、主ケーブル内部の温湿度監視が重要であり、自動や手動のモニタリングを実施している。自動監視ではシステム構築に労力を要し、手動監視では高所の主ケーブル上での点検員による測定作業が必要となる。

本稿は、近年手軽に扱えるようになった低消費電力で、長距離無線通信のIoT (Internet of Things) 技術を活用し、インターネットや社内LANなどを介して遠隔から情報閲覧することを目標に開発した「新たなケーブル送気監視システム」とシステム導入により期待できる効果などを報告する。

To protect the wires of the main cables of suspension bridges from corrosion, a dry-air injection system has been installed, which circulates dry air through the cables. In order to ensure the effectiveness of this system, it is essential to monitor the temperature and humidity inside the main cables. Both automatic and manual monitoring methods are currently being used. Automatic monitoring requires significant effort in system construction, and manual monitoring requires performing measurements by inspectors on the main cables at high elevations.

This paper reports on the development of a new dry-air injection monitoring system, which leverages recent advancements in low-power, long-range wireless IoT (Internet of Things) technology. The goal is to enable remote access to monitor data via the Internet or internal LAN. Additionally, the paper discusses the potential benefits expected from the introduction of this system.

1. はじめに

本州と四国を結ぶ本四連絡橋のうち長大橋は17橋あり、うち10橋は吊橋である。これらの吊橋に加え、国内外の主要な長大吊橋の主ケーブルには、除湿した乾燥空気を主ケーブル内に送気し、素線を腐食させない環境とすることで防食する「ケーブル送気乾燥システム（以下「送気システム」という。）」が導入されている。この送気システムによって主ケーブルを防食するには、送気する乾燥空気の温湿度やシステム全体の稼働状況の監視及び排気される乾燥空気の異常値（管理基準値：RH 40%以下）の早期発見と適切な対応が重要である。

現状の主ケーブル内の温湿度監視システムは、吊橋ごとに異なり、モニタリングポイントの温湿度センサーまで電源線や通信線を配線して自動測定するケース、電源線だけ配線し測定データをデータロガーまで無線送信によって自動測定するケース、及び人力でモニタリングポイントの温湿度を手動測定するケースが

ある。また、自動測定するケースでは、専用通信線や携帯電話回線を使用して管理事務所内に設置した専用PCへ転送される場合と、現地橋梁内の通信機械室に設置したデータロガーに保存される場合がある。

自動測定するケースでは、システム運用から年数が経過し更新時期を迎えており、更新に当たっては本線近傍の高所での電源・通信線や付随設備などの撤去・再設置作業となるなど課題がある。また、手動測定するケースでは、空気中の水分量が多い夏季に主ケーブル上のモニタリングポイントで測定しているが、日陰もない高所であり熱中症リスクを伴う作業となっている。

本報告では、現状の温湿度監視システムのこれらの課題に対し、近年、手軽に扱えるようになった長距離無線通信のIoT技術を活用した新たなケーブル送気監視システム（以下「本システム」という。）の開発と効果について述べる。

2. 本システムの開発

本システムの開発は、現状システムの課題を整理し課題解決に資する開発要件を設け、システムの検討・設計の後、プロトタイプ機を製造して構築したシステムの確認試験を実橋で行った。

2.1 現状システムの課題

現状のシステムには、運用している管理者への聞き取り調査及び過去の更新工事資料より、自動測定している機器の更新や新たに自動測定する機器新設には以下のような課題がある。

- (1) 電源線や通信線、測定器などの資機材運搬は主ケーブル上で人力運搬のみであり、設置時には多くの人員が必要となる(写真-1)。また、電源線や通信線の延長は数 km と長く、車線規制を伴う資機材搬入が必要となる。
- (2) 主ケーブル上の作業は、本線や海面上より高所であり、特殊な作業環境であることから通常橋梁以上の安全対策が必要となる。
- (3) 自動測定データは、インターネットや社内 LAN に接続されていないオフライン PC やデータロガーに保存されるため、リアルタイムでの情報閲覧とデータ活用が出来ない。

また、手動測定のケースでの課題は、不安定な主ケーブル上にて点検員がモニタリングポイントまで行き、温湿度測定(手動測定)を行う必要があること、測定時期が空気中の水分量が多い 6 月～8 月の多湿時期¹⁾であり、主ケーブル上は日陰もなく熱中症リスクが高いことがあげられる(写真-2)。

2.2 各課題に対する方策

各課題に対して、本システムでは以下の方策による解決を目指した。

- (1) 通信方式は、全て無線式とし、通信線を不要とする。
- (2) 給電方式は、自立発電方式とすることで電源線を不要とする。

- (3) 左記(1), (2)により電源線や通信線が省略されたことで、大量の配線を規制によって搬入する必要がなくなり、かつ主ケーブル上の作業量を軽減し、落下物リスクを低減する。
- (4) 本システムを構成する機器は汎用性が高いデバイスを採用し、モニタリングポイントの増設などシステム拡張が経済的なものとする。
- (5) 測定したデータは、外部のクラウドサーバー(以下「外部サーバー」という。)や社内LANのデータベースへ転送することとし、遠隔からWEBによる閲覧やデータダウンロード可能とする。

2.3 本システムの構成と特徴

本システムは、データ送信を無線通信方式とするため、センサーを備えた機器(以下「子機」という。)と子機から送信されたデータを社内LANや外部サーバーへ転送する機器(以下「親機」という。)から構成することとした(図-1)。なお子機と親機との直接通信が、主塔やハンガーロープなどにより障害を受けるケースを想定し、両者の通信を中継する機能を持たせた機器(以下「中継機」という。)も構成要素に組み込むこととし、いかなる状態でも通信を確保するものとした。

サーバー上のデータは、各自のPCから閲覧とデータダウンロードが可能なモニタリングソフトを構築することとした。

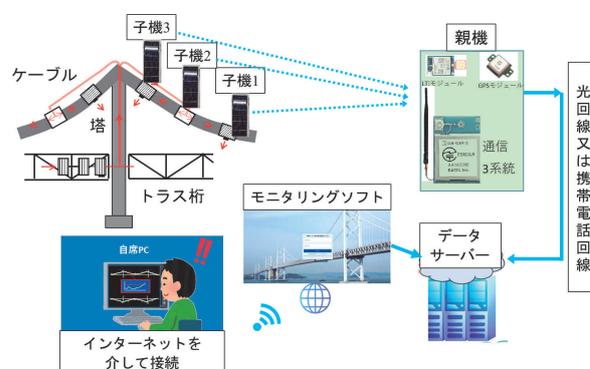


図-1 本システムの構成概要図

Fig1: System Configuration Overview of Monitoring System



写真-1 現状システムの主ケーブル上における更新作業
Photo 1 Renovation Activities of the Existing System on Main Cables



写真-2 点検員による手動測定状況
Photo 2 Manual Inspection/Measurement
Performed by Inspector

2.3.1 無線通信機器（親機、子機、中継機）の仕様

本システムの無線通信機器の仕様について以下に述べる。表-1に無線通信機器（親機、子機、中継機）の主な仕様を、図-2に子機の構成を示す。

機器に搭載する無線通信は、消費電力が少なく、長距離通信（見通し良好な環境で数10km程度）が可能、かつ無線局免許が不要な通信規格であるLoRa(以下「LoRa通信」という。)を使用することとした。このLoRa通信はLPWA(Low Power Wide Area)に含まれる通信技術であるが、Sigfoxなど他の技術と比べオープンな規格で、利用者が必要とする独自ネットワークを容易に構築できる利点がある。

機器搭載の自立電源は、太陽光パネルで発電し、蓄電池を搭載することで、外部からの電源供給を不要とした。蓄電池容量は、太陽光パネルの発電不良なども想定し、蓄電池単独でも約1か月間の稼働が可能な容量とした。

子機で使用する温湿度センサーは、温度の測定範囲が-40℃～125℃、精度±0.1℃(25℃)、湿度の測定範囲がRH 0%～RH 100%、精度±0.5%(RH10%～RH50%範囲)であり、管理基準値の確認には十分な性能である。

子機での温湿度の測定は、毎正時に実施し、都度、測定データを子機から親機へ送信することとした。親機へ毎正時に送信されるデータは、測定データ及び機器稼働情報を含め20byte程度の容量であり、約0.5秒で送信が完了する。

機器の定時性確保のため、人工衛星の信号から時刻補正をすることとした。これにより複数箇所を測定した際に同時刻のデータが取得可能となる。

親機には、社内LANなどへの有線接続とは別に、携帯電話回線により外部サーバーへデータを転送できる機能を搭載している。

2.3.2 モニタリングソフトの仕様

PC端末での閲覧は、専用ソフトを必要としないブラウザ方式とし、親機からのデータ受信後、即座に更新される仕様とした。また、過去データの検索やCSV出力などの機能を搭載した。

親機からサーバーに送付されるデータには、機器の蓄電容量や通信状況などの機器情報も送信されており、PC端末での閲覧では温湿度などのデータに加え、機器の状況についても表示させることとした。また、湿度データが基準を超えた場合や機器異常が発生した際は、メール送信によるアラート及び画面表示できる仕様とした(図-3)。

表-1 無線通信機器（親機、子機、中継機）の主な仕様

Table 1 Main Specifications of Wireless Communication Devices

項目	仕様	備考
LoRaモジュール	型式 : EASEL製 ES920LR3 変状方式 : LoRa 周波数 : 920.6~928.0MHz 受信感度 : -140dBm 送信出力 : 13dBm(最大) 通信速度 : 146bps~31kbps 消費電力 : 29mA(送信時)・5.7mA(受信時)	ARIB STD-T108 技術基準 適合認定 取得品
LoRaアンテナ	型式 : λ/2モノポールアンテナ 周波数 : 916~928MHz 利得 : 3dBi以下 指向性 : 無指向性	
蓄電池	電池容量 : 6000mAh, 電圧 : 3.2V (リン酸リチウムイオン)	親機 3個, 子機・中継機 2個搭載
太陽光パネル (1枚あたり)	発電量 : 1.09W, 電圧 : 5.9V・電流 : 180mA	2枚搭載
内蔵メモリ 容量	親機・中継器 : 8MB (14日分) 子機 : 1MB (4日分)	—
GNSS モジュール	型式 : 太陽誘電製 GYSFDMAXB 受信チップ : MT3333 対応測位衛星 : GPS(米国), QZSS(日本) 受信信号 : L1/C/A 測地系 : WGS1984 データ更新レート : 毎秒1~10回	
温度センサー	測定範囲 : -40℃~125℃ 計測精度 : ±0.1℃(25℃)	—
湿度センサー	測定範囲 : RH0%~RH100% 計測精度 : ±0.5%(RH10%~RH50%範囲) ±1.0%(RH50%~RH90%範囲)	—

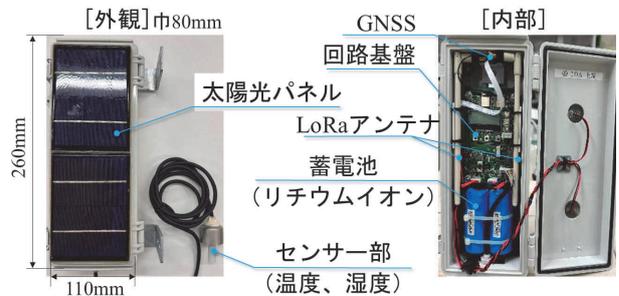


図-2 子機の構成

Fig 2 Components of the End Device

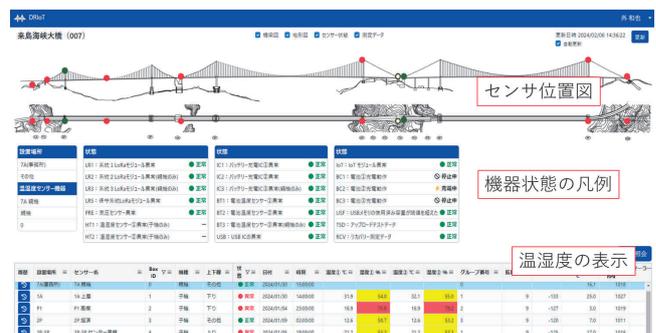


図-3 PC端末に表示されるモニタリング画面

Fig 3 Monitoring Screen Displayed on the PC

3. 実橋試験

実橋試験は、橋面上に自転車・歩行者道があり施設内への立ち入りが容易で、明石海峡大橋への適用を見据え全長が同程度の来島海峡大橋で実施した（以下「来島試験」という）。その試験結果から明らかとなった課題を踏まえ、大島大橋で2回目の試験を実施した（以下「大島試験」という）。

3.1 来島試験の概要

来島試験は、来島海峡第一～第三大橋（全長約4km）に子機9台、親機2台を2023年12月中旬から約1か月間設置した。子機の設置場所は、主ケーブル、主塔塔頂、路面付近、橋台上屋など、主ケーブル上に設置することを前提に、主塔やハンガーロープなどがあってもLoRa通信が可能かを検証するのに現実に即しかつ、無線通信に厳しいと考えられる箇所を選定し設置した（図-4）。

親機は、社内LANとの接続可能な通信機械室がある7A料金所と、外部サーバーへ携帯電話回線を用いたデータ転送を想定した試験が可能な来島海峡SAとした。なお、来島海峡SAの親機と子機の間には、7Aの親機より障害となる主塔やハンガーロープなどが少ない通信環境である。

3.2 来島試験の試験結果

本試験の結果と課題を以下に記述する。

(1) 実橋環境でのLoRa通信の確認

LoRa通信は、来島海峡SAの親機から海峡を挟んで最大4.6km離れた地点に設置した子機から、毎正時に取得した測定データが親機へ送信されていることを確認した。更に橋軸方向のLoRa通信は、主塔やハンガーロープといった既設構造物に大きく影響されないことを確認した。

(2) 親機と子機の自立電源の検証

親機と子機の自立電源は、現地設置後、数週間で電源喪失に陥った。原因は、蓄電池の劣化に配慮し充電電流に制限を設けたものの、予想外の消費電流であったことや、機器設置時の初期充電量の不足などが重なったこと

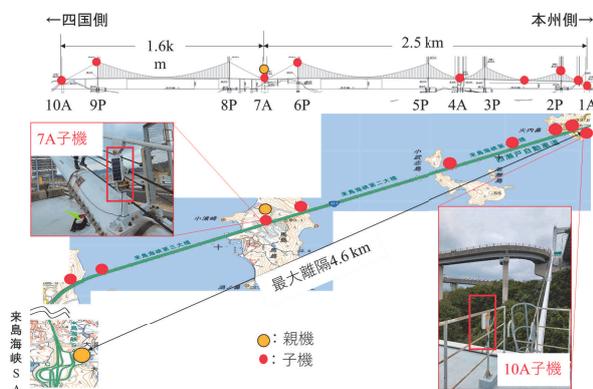


図-4 来島試験における親機及び子機の設置位置

Fig 4 Gateway and End Device Placement in the Kurushima Field Test

である。

(3) 親機からデータサーバーへのデータ転送

7A料金所と来島海峡SAの両親機とも接続方法の違いがあったものの、データが転送されたことを確認した。また、モニタリングソフトでは、毎正時に情報が更新されること、過去データの検索及びCSV形式での出力が可能であることを確認した。

(4) その他

子機と親機の通信において、測定データの一部欠損を確認した。原因は、毎正時に複数の子機が一斉に親機へデータ送信をすることにより、親機の受信感度低下が発生したことによるものであった。なお、毎正時に取得していた測定データは、通信異常によるデータ送信不良を想定し、データ保存用に搭載した内蔵メモリに保存されていることを確認した。

来島試験後、電源喪失に対しては、子機や親機の消費電流と充電動作が確認できたことから、改めて充電電流制限の見直しを実施した。また、データ欠損には、各子機から親機への通信に時間差を設けることで対応した。また、来島試験の上記以外の反省点としては、機器製作から現地試験までの室内試験期間を十分に設けなかったことも不具合が生じた一つの要因であったと考えている。

3.3 大島試験の概要

大島試験は、来島試験の課題や反省も踏まえて十分な室内試験期間を設け、実橋での試験前に前回課題への確認試験や、新たに子機及び親機間の通信障害や機器・電源回路の供用後の故障を想定した試験なども実施した（写真-3）。また、来島試験で実施していない中継機を加えたLoRa通信のデータ転送の試験を併せて実施した。

本試験では、実橋の主ケーブルのモニタリングポイントに温湿度計を入れ近傍に機器を設置するとともに、主ケーブル上や主塔塔頂などの通信環境が厳しいと思われる箇所も含め、子機9台、橋台上屋に親機及び中継機をそれぞれ1台ずつ設置して、2024年10月初旬から2025年3月までの約6か月間実施した。



写真-3 大島試験における無線通信機器の設置状況

Photo 3 Wireless Device Installation in the Oshima Field Test

3.4 大島試験の試験結果

本試験の結果を以下に記述する。

- (1) 充電制御の改善により十分な蓄電池の電圧を期間中確保できた。
- (2) 各子機から親機へのデータ送信に時間差を設けたことにより測定データの欠損は発生しなかった。
- (3) 中継機は、子機からの測定データを受信し、親機へ確実に送信できた。また、中継機の状態監視も可能であった。
- (4) 通信障害、電源喪失など故障を想定した試験を実施し、その挙動などが確認できた。

来島試験と大島試験の実橋試験を経て、本システムは、様々な課題解決ならびに不具合の対策が十分にできたものと考えている。

4. 本システム導入により期待できる効果

従来の有線での自動計測システムは、温湿度センサーの追加が容易ではない。一方、本システムでは、電源線や通信線が不要なことから、温湿度を測定する子機の増設や移設が容易である。そのため、以下のような効果を期待できるものと考えられる。

4.1 乾燥空気の漏洩特定作業の負担軽減

従来システムは、送排気バンドのみに温湿度センサーが設置されている。排気バンドに流入する乾燥空気は、原則として2つの隣接する送気バンドから主ケーブル内に送風されたものである。そのため、排気バンドでの相対湿度が高い場合には、どちらの送気バンドから送風した空気の相対湿度が高いか判別できない。そのため、空気漏洩箇所などの原因調査は、2つの系統の範囲を実施する必要がある。

本システムは機器が安価で設置作業が手軽であることからモニタリングポイントの増設が用意である。例えば排気バンド手前の隣接のケーブルバンドに設置すること

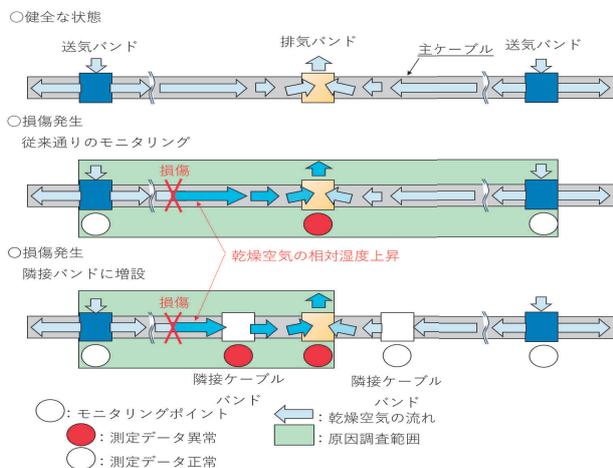


図-5 本システムを活用した効率的な維持管理の概要図
Fig 5 Concept Diagram of Efficient Maintenance Using This System

で漏洩している系統の特定が可能となり、その結果、空気漏洩調査範囲を半減することができる(図-5)。

4.2 ライフサイクルコストの低減

従来システムと本システムのライフサイクルコストの比較を行った。比較は、支間長1000m級吊橋において100年間運用した場合の累積費用で行った。試算では、モニタリングポイント(子機)数を30箇所、設備全体の更新頻度を現状システムは10年ごと、本システムは5年ごとと仮定した。従来システムの100年後の累積費用を100%とすると、本システムは約50%であり、経済性が高いことを確認した(図-6)。

5. 本システムの展望

5.1 他吊橋管理者への展開

本システムは、送気システムを導入している他の吊橋管理者でも活用できるように、開発当初からシステム検討を実施してきた。大きな違いは、外部サーバーの活用と親機からサーバーへのデータ転送に携帯電話回線を使える仕様としていることである。来島・大島試験でも子機や親機の室内試験では、外部サーバーを活用した試験を実施しており、モニタリングソフトの外部サーバーへの移植なども含め十分可能である。

他の吊橋管理者による本システムの活用の際には、監視システムの構築支援に加え、取得データに基づき送気システムに関するJB本四高速グループの知見を活用した技術支援が可能と考える。

5.2 その他の利活用

本システムは独自ネットワークの構築が容易なLoRa通信を用いるため高い汎用性を有しており、吊橋の送気監視システムの用途に限らず子機のセンサーを変えることにより、低頻度の定点測定などに十分活用できる。

実際、低消費電力で長距離通信が可能なLPWA技術を

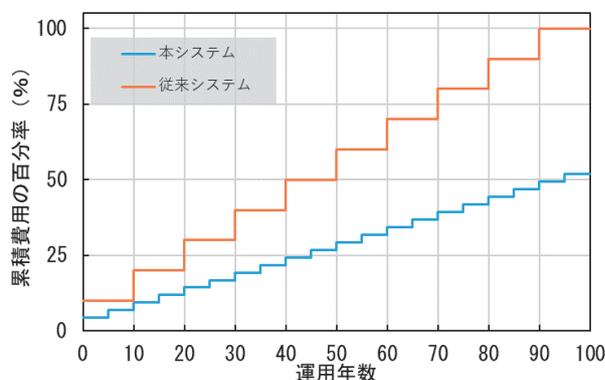


図-6 100年間の累積運用費用の比較
Fig 6 100-Year Cumulative Operating Cost Comparison

活用した計測システムの研究では、鋼箱桁内にて活荷重により生じる部材断面のひずみ応答を計測し、桁外の受信機へデータ転送が試みられ、モニタリングへの有用性が示されている²⁾。また従来の間欠的な点検では、把握が困難な部材の損傷の早期発見や損傷状況を常時遠隔監視するために活用した事例がある³⁾⁴⁾。本システムを活用した新たな遠隔モニタリングは、今後ますます活用されるものと考えられる。

6. まとめ

本システムの実用化を目指して、2か年におよぶ実橋試験で得られた結果を以下に示す。

- (1) 子機と親機間のLoRa通信は主塔やハンガーロープなどの影響を受けず通信可能であった。
- (2) 親機からデータサーバーへのデータ転送は、有線・無線の双方とも転送された。
- (3) モニタリングソフトはモニタリングデータを受信後、すぐに事務所などで閲覧でき、かつ過去データの検索及びCSV形式での出力が可能であった。
- (4) 親機及び子機の自立電源は、動作に十分な充放電制御がされた。
- (5) 子機と親機間のデータを中継する中継機を介しても、親機へデータ転送されていることを確認した。
- (6) 子機の価格が安価で設置作業が手軽であることから増設が用意であり、排気異常時の原因特定作業の負荷が軽減できる。
- (7) ライフサイクルコストは、従来システムと比較して半減が可能である。
- (8) 他の吊橋管理者への導入も容易な仕様としている。

7. おわりに

本システムは、本四連絡橋の大島大橋に初めて導入される。導入後は想定した効果の検証を実施する予定である。これらと並行して寒冷地のための検討や、ケーブル送気監視システム以外への応用を可能とする仕様開発に取り組む所存である。

参考文献

- 1) 吊橋ケーブル送気乾燥による防食システム設計・施工・維持管理指針(案) 本州四国連絡高速道路(株) 平成23年6月
- 2) 関家英彦, 木ノ本剛, 高木真人, 丸山收, 三木千壽: LPWA を活用した鋼箱桁橋における無線計測に関する基礎的研究, 土木学会論文集 F3(土木情報学), Vol.76, No.1, 53-62, 2020
- 3) 栄翔太, 藤田憲二, 後藤稜平: LPWA 無線ひずみ計測による遠隔監視手法の実践, 本四技報, Vol.49, No.143, 2025.3
- 4) 栄翔太, 横井芳輝, 藤田憲二, 河野晴彦, 後藤稜平, 溝上善昭, 石川敏之: IoT を活用した吊橋センターステイロッドの遠隔監視手法の試行, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.4, No.1, 85-94, 2025.3

主ケーブル外装モニタリングシステムの開発

Development of Main Cable Exterior Monitoring System

大淵 慶大 Keita Obuchi

本四高速道路ブリッジエンジニアリング(株)
技術事業本部 技術開発部 技術3課

永島 源土 Minato Nagashima

しまなみ今治管理センター
施設課

大浦 義司 Yoshiji Oura

本四高速道路ブリッジエンジニアリング(株)
技術事業本部 技術開発部 技術3課

概要

道路橋は、国土交通省の道路橋定期点検要領で定められた近接目視による状態把握（点検）が必要である。海峡を跨ぐ吊橋などの長大橋も同様であるが、これら長大橋は主ケーブルやハンガーロープなど、高所かつ海上部に位置した近接困難な部材が多数存在する。これらの部材のうち吊橋の主ケーブルについて、簡易かつ効率的に点検を行うことができるよう、主ケーブル全周方向画像の撮影及び画像解析による変状把握が可能な主ケーブル外装モニタリングシステムを開発した。本文ではこれまでの取組、現状の課題と対策について述べる。

Road bridges require close visual inspection to assess their condition, as stipulated by the Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism's Road Bridge Periodic Inspection Guidelines. The same applies to long-span bridges such as suspension bridges that span straits, but these bridges have many components that are difficult to access, such as the main cables and hanger ropes, which are located high above the water. To enable simple and efficient inspection of the main cables of suspension bridges, we have developed a main cable exterior monitoring system that can capture images of the entire circumference of the main cable and identify any abnormalities through image analysis. This paper describes the efforts made so far, as well as current issues and countermeasures.

1. はじめに

本州四国連絡高速道路（株）（以下「本四高速」という。）では、17橋の長大橋の維持管理を行っている。これらの、長大橋は構造が複雑かつ部材数が多く、海上部に橋梁があることから接近手段が限られるなど点検業務に多くの時間を要している。そのため、本四高速では技術開発や共同研究に取り組み、長大橋の維持管理の高度化、効率化を進めている。その1つとして近接目視や接近に多大な労力を要し、また一般交通への影響がある吊橋の主ケーブルについて新たな点検手法の開発を進めている。現在、主ケーブルの点検では主ケーブル上へケーブル作業車を架設し行っている（写真-1）。ケーブル作業車による点検は、ケーブル全周を安全かつ確実に点検できる利点はあるが、架設に際して交通規制を伴うため一般交通への影響や作業者の安全確保に配慮する必要がある。また、ケーブル作業車の作業足場は狭く、搭乗人員が限られることから作業の効率性においても課題がある。



写真-1 ケーブル作業車架設状況
Photo 1 Cable work vehicle installation status

2. 装置の構想

前章の課題解決に向けて、まずは明石海峡大橋のゴムラッピングにおける10mm×10mm以上の塗膜はく離を対象にシステムの確立を目指すこととした。近接目視に代わる点検装置の試作機について当面の開発目標を以下に示す。

- ①可搬性：装置は人力での運搬を実現するため、部品単位で分割が可能
- ②組立性：人力のみで装置の組み立てが可能であり、クレーンや交通規制が不要
- ③走行性：ハンドロープ上に台車を設置し、人力で装置を押すことで移動が可能
- ④安全性：急傾斜部でも構造的に脱輪しない
- ⑤安全性：点検員が装置から手を離れた状態でも、ブレーキによりその場で静止が可能
- ⑥機能性：カメラを複数台配置し、主ケーブル全周の画像撮影が可能
- ⑦機能性：撮影画像から自動で変状判定が可能
(10mm×10mm以上の塗膜はく離を対象)
- ⑧機能性：撮影画像から展開図を作成し、変状面積の算出が可能

なお、今回の装置は乾燥環境下での使用及び点検ごとの架設撤去を想定しており、雨天時などの湿潤環境下での使用並びに主ケーブル上への常設や長期間の仮置きはしないことを条件とした。これらの項目及び条件を満たすことで、安全かつ簡易に点検が可能になることを目指して開発を行うこととした。

3. 試作機の開発

3.1 試作機の概要

前章の項目を基に主ケーブル点検装置の試作機（図-1）の開発を行った。

試作機は大きく分けて、①台車、②アーム、③ビームの3種類の部品で構成され分割できる構造になっている。

可搬性及び組立後の人力による移動を考慮し、素材は軽量かつ強度のあるアルミ素材（A6063）を選定した。

台車には走行を補助する電動アシスト装置を搭載するとともに、走行時はブレーキハンドルを把持することでブレーキが開放され点検員が装置から手を離れた時は逸走を防止するデッドマンブレーキ機構を採用した。また、急傾斜部でも装置の脱輪が発生しないよう、車輪下部へ浮き上がり防止装置を取り付けた。アームには6台のカメラを取り付け、主ケーブルの全周撮影を行うこととし、台車上部にはPC及び給電のためポータブル電源を設置した。

点検装置試作機構想図の台車部上面図を図-2に示す。

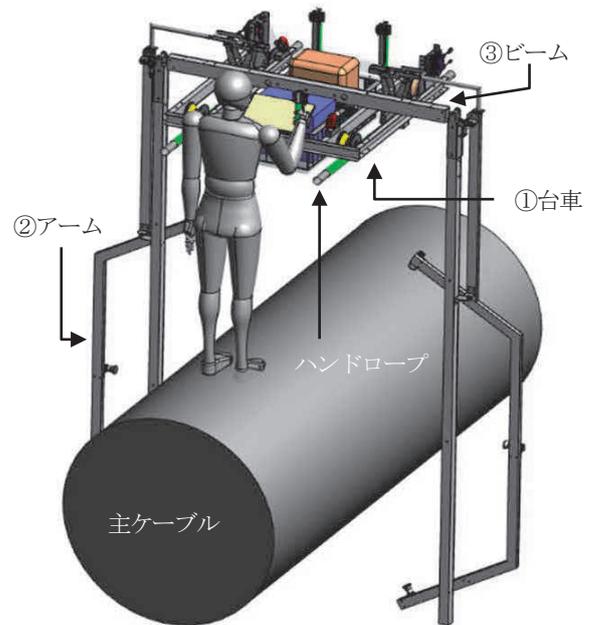


図-1 点検装置試作機構想図

Fig.1 Inspection device prototype concept drawing

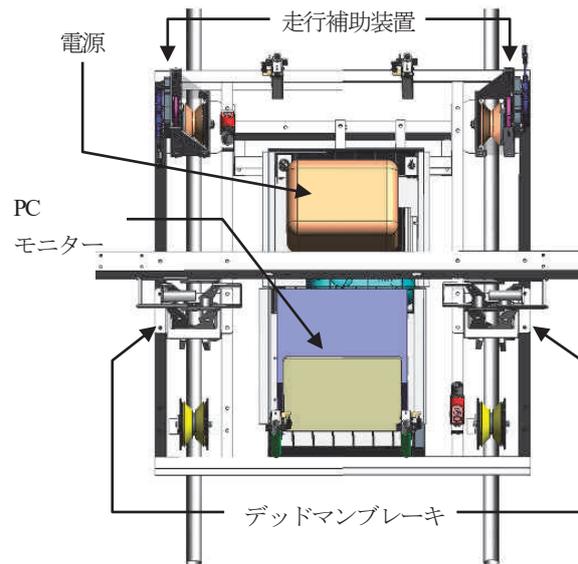


図-2 台車部上面図

Fig.2 Top view of the bogie

3.2 走行補助装置

本四連絡橋では、主ケーブルの傾斜角が最大33度に達する。人力での装置移動は傾斜角が大きくなると点検員の負担増加となるため、電動アシスト装置を搭載した。電動アシスト装置は100Wのモーターを搭載し、前輪側へ駆動力を伝達することで、33度の傾斜角でも平地（0度）と同程度の力で装置の移動が可能になるよう選定した。電動アシスト装置を図-3に示す。

100Wモーターはベルトを介して車輪につながっており、駆動力を伝達する。駆動車輪はハンドロープとの摩

擦力を確保するため、ケーブル作業車のキャタピラで使用されているゴム材を選定し、強度やメンテナンス性を考慮して50mm厚の車輪形状に削り出し、アルミ製の外輪で挟み込む形とした。

また、電動アシスト装置は装置全体の前後重量バランスを考慮し前方へ配置することとした。

更に、後述するデッドマンブレーキを解放した状態でも、下方の点検員に過度な負荷がかからないこと、装置が降下することがないように、ハンドルを把持した時点でモーターが駆動し重力補償力を発生するようにした。電動アシスト装置の仕様を表-1に示す。

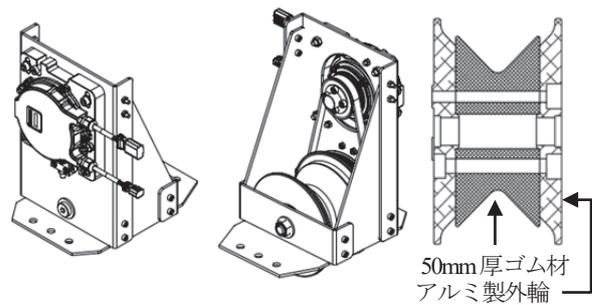


図-3 電動アシスト装置

Fig.3 Electric assist device

表-1 電動アシスト装置仕様
Table 1 Electric assist device specifications

大項目	小項目	仕様	備考
必要性能	駆動力	890N以上	重力補償力 534N, 効率 60% 装置重量 980N, 傾斜角 33度を想定
	ブレーキ力	800N以上	重力補償力 534N×150%以上
	バッテリー	250Wh以上	平均角度 12度と想定 10m/min で 5km 走行可能な容量
以下部品の選定			
1)ベルト駆動	減速比	1 : 2.4	
2)モータ	出力	100W	
	トルク	定格 5Nm 最大 10Nm	駆動力 600N相当 駆動力 1200N相当
3)バッテリー	公称電圧	25.2V	416Wh
	電流容量	16.5Ah	

3.3 浮き上がり防止装置

主ケーブル点検装置は、長いアームにカメラが配置されている構造上、重心位置が前方にある。各搭載物の配置・重量分配により33度の傾斜角でも装置の浮き・脱輪はしないよう機器配置したが、傾斜が大きくなると装置の後輪が浮き上がる可能性がある。そこで、万が一の浮き上がりに備え全ての車輪に浮き上がり防止装置（図-4）を設置し、物理的に浮き・脱輪を防ぐ機構とした。浮き上がり防止装置はスプリングによって可動する仕組みとし、ハンドロープ支柱乗り越え時でも前方又は後方どちらか一方は必ず機能を保持する機構となっている。

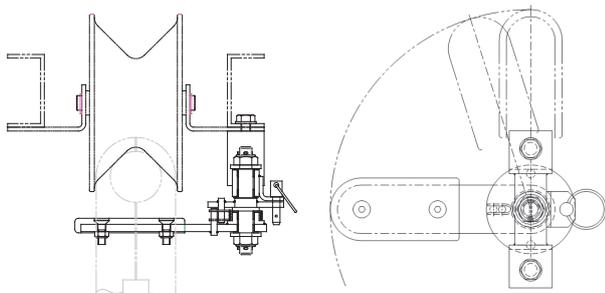


図-4 浮き上がり防止装置

Fig.4 Lift up prevention device

3.4 デッドマンブレーキ

装置は点検員が人力にて移動させる装置であることから、下方への滑り・自由降下を確実に防止する必要がある。ブレーキは通常時ハンドロープを挟み込み制動力にて装置を保持し、点検員がハンドルに取り付けられたレバーを握りこんだ場合にブレーキを解放するデッドマンブレーキ方式とした。点検員がレバーを離すと即時制動力がかかり、不意の降下を防止することができる。また、レバー操作力は一般的な自転車のブレーキレバー解放力を参考に、49N以下を目標に開発を行った。図-5にデッドマンブレーキの機構を示す。

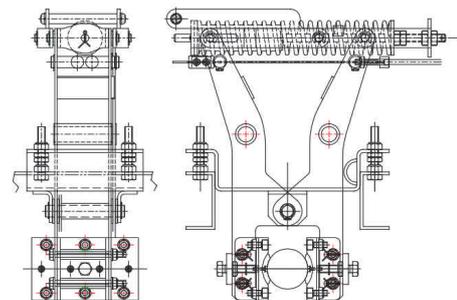


図-5 デッドマンブレーキ

Fig.5 dead man's device

3.5 画像取得及び撮影システム構成

撮影に使用するカメラはアーム上に6台設置し、1台あたり主ケーブル円周方向の60度範囲を撮影することで全周撮影に対応できる。また、ロータリーエンコーダとカメラの静止画撮影を同期させることで移動距離に応じた連続撮影を行うこととした。カメラは軽量かつ10mm×10mm以上の塗膜はく離変状の判定に必要な解像度を有した工業用カメラを選定した。撮影距離は1台あたり60度範囲を撮影するために画角や焦点距離から500mmとした。全カメラの撮影距離を統一し、同じ画角の画像を取得することで、撮影後の画像処理の効率化を図った。撮影システムの概要を図-6に、カメラの配置を図-7に、使用機材を表-2に示す。

撮影画像に関して、レンズの収差やボケを排除し、高い解像度の画像を取得するためカメラセンサの撮影範囲1200pixelのうち中央の8pixelのみ使用し、撮影した短冊状の画像を合成して1枚の画像を生成するパーシャル撮影方式を採用した。撮影方式のイメージを図-8に示す。

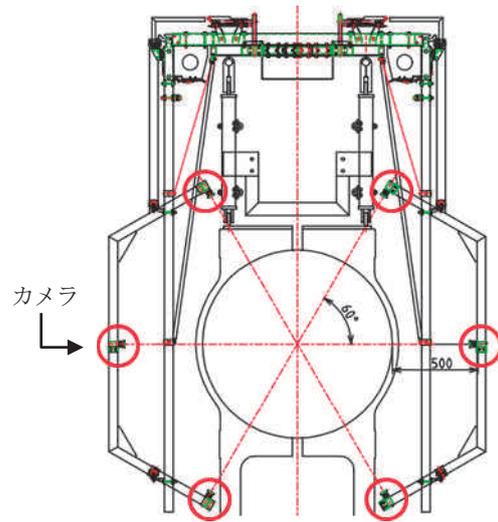


図-7 カメラ配置図

Fig.7 Camera layout diagram

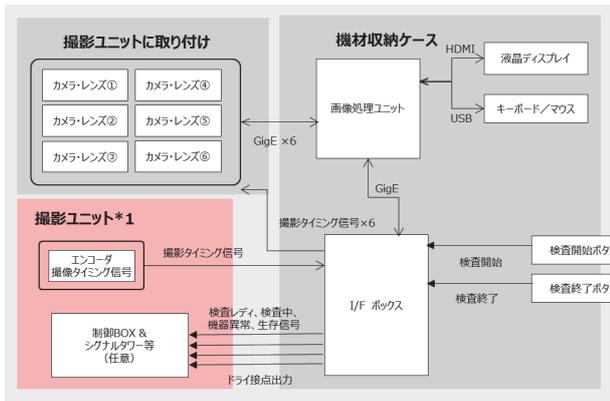


図-6 撮影システム概要

Fig.6 photography system overview

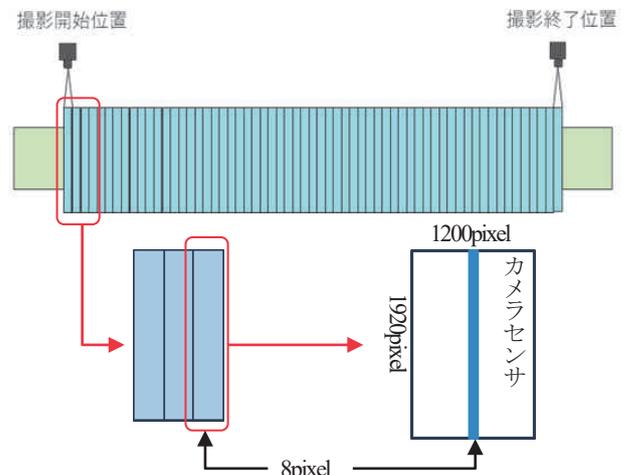


図-8 撮影方式イメージ

Fig.8 photography method image

表-2 撮影システム機材

Table 2 Electric assist device specification

項目	品目/型式	数量	主な仕様
撮影部分	カメラ a2A1920-51gcBAS	6台	W=1920 pixel, H=1200 pixel
	レンズ LM5JCM-V	6本	f=5mm
機材部分	ロータリーエンコーダ DFS60A-S4PL65536	1台	
	エンコーダプログラミングケーブル PGT-08-S	1台	DFS60A用エンコーダの接続・プログラミング用ケーブル
	エンコーダプログラミング装置 PGT-10-Pro	1台	DFS60A用エンコーダのプログラミング用装置
	画像処理 PC	1台	OS : Windows10
	I/F ボックス	1台	エンコーダ信号の6分岐機能 外部入出力 物理ボタン2個 (検査開始, 検査終了)
	ディスプレイ	1台	タッチパネル対応 14インチ

4. 実橋試験と結果

4.1 来島海峡第三大橋での実橋試験

実橋における試験は、急傾斜角であり、ケーブルへのアプローチがしやすい場所、一般者に影響の少ない場所を検討した結果、来島海峡第三大橋の9P - 10A側径間の10A付近の管理用地内にて2パネル×16m（約32m）において試験を実施することとした。

来島海峡第三大橋の側径間では傾斜角が24度あるため、主に急傾斜部におけるブレーキ性能、台車浮き上がり防止機能、走行補助機能、撮影システムに関する試験を実施した。

4.2 明石海峡大橋での実橋試験

来島海峡第三大橋での実橋試験後、当初の目標としていたゴムラッピングのある明石海峡大橋の4A付近にて3パネル×13m（約39m）において2回目の試験を実施した。明石海峡大橋での試験は主に装置の可搬性、走行性及び撮影システムの確認を目的として実施した。

試験に際しては、直下の道の駅を管理する兵庫県公園管理事務所とも打合せを行い、試験箇所直下のスペースにガードマンを配置して安全管理を行うこととした。

また、今回の試験では10mm×10mmの塗膜剥がれを変状把握対象としていたが、両橋梁とも今回の撮影箇所には変状が認められない位置であったため、黒色ビニールテープを数種類の形状に加工して模擬変状を作成し、カメラによる画像撮影を行った。

4.3 試験結果

(1)可搬性の評価

装置を人力運搬可能な重量やサイズに分割することで、管理用通路及びマンホールを想定通り運ぶことが可能であったが、台車部は重量が約40kgあり運搬性は改善する必要がある。

(2)組立性の評価

人力での主ケーブル上での組み立て設置が可能であった。設置に必要な時間は、設置場所・環境によって変動するが、今回の試験では作業員3人で地上から主ケーブル上への運搬40分、組立20分で、計1時間必要であった。

なお、点検初日のみカメラの取り付け及びピントの確

認・調整を行い別途1時間必要となった。部品の分割・接続方法の改良や設置手順を効率化及びマニュアル化することで、更に省力化を目指す必要がある。

(3)走行性の評価

来島海峡第三大橋、明石海峡大橋における実橋試験では、主ケーブルの傾斜角が24度（走行距離延べ365.3m）及び0度～4度（走行距離延べ291.7m）の2ケースで走行試験を行った。

走行補助装置は十分に機能しており、勾配抵抗を感じないほどスムーズに走行が可能で、いずれのケースでも人力走行が可能であった。また、3.2項で記述した重力補償力に関しても問題なく、ハンドル把持、ブレーキ解除状態でも装置は降下することなく点検員に負荷がかかることは無かった。

ただし、来島海峡第三大橋ではハンドロープ間隔が一部標準図より狭い箇所があり、車輪との接触面がずれることで抵抗が増加した。また、デッドマンブレーキの隙間調整不足に伴う解放量不足により、ブレーキがハンドロープ表面に一部接触する状態となったことで、一部区間で走行時の負荷が大きくなる課題が残った。

(4)安全性の評価

浮き上がり防止装置は問題なく機能し、ハンドロープ支柱乗り越え時においても装置の浮き上がりや脱輪のリスクは無かった。

デッドマンブレーキは傾斜角が33度（室内試験：鋼管）、24度（実橋試験：主ケーブル）いずれにおいても完全な停止が可能で、室内・実橋での両試験にて1180N(必要制動力の150%以上)の力で下降方向へ引っ張り試験を行っても装置が動くことは無く、十分な制動力を確認した。

(5)機能性の評価

主ケーブルの全周撮影に関して、カメラ6台で問題なく撮影が可能であった。撮影時はリアルタイムで撮影した変状がモニター上へ表示されるとともに、ロータリーエンコーダと同期させているため、変状位置に関しても走行距離から算出が可能となった。各パネルの検査終了後には自動で各カメラの撮影画像が1パネル分合成され、点検後の確認も容易となった。点検中の表示画面を図-9に、点検後の画面を図-10に示す。

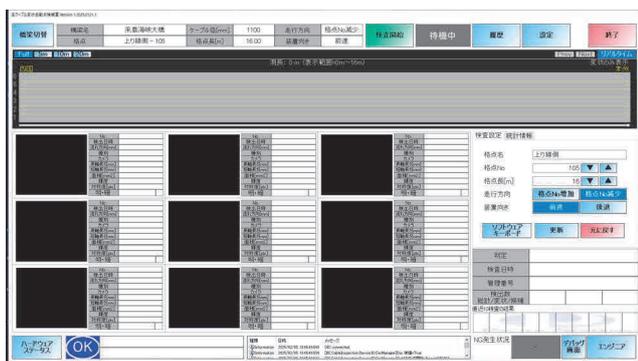


図-9 点検中表示画面（例）

Fig.9 Display screen during inspection



図-10 点検後表示画面（例）

Fig.10 Display screen after inspection

点検中は、撮影された画像幅1000pixel (8pixel*125枚)ごとにリアルタイムで結合し変状判定を行い、おおむね時差なく最大9箇所分の変状が画面に表示される。各変状は位置(検査開始位置からの距離)、撮影カメラNo、長さや面積などのサイズが同時に計算され表示される仕組みとした。

点検後は、検出した変状を個別に確認できる仕組みとした。また、点検終了後、約30秒で各カメラの撮影した画像の合成が完了し、現場又は事務所で確認が容易にできる。

塗膜剥がれ変状について、今回は写真-2のように黒色ビニールテープで模擬変状を撮影したが、10mm×10mm以上の変状検出が可能であることが分かった。

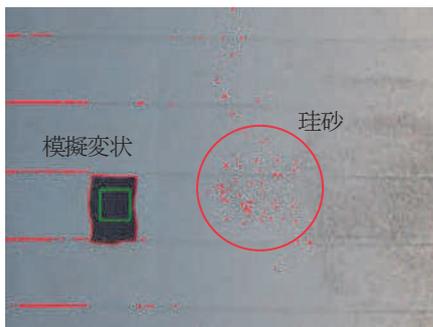


写真-2 模擬変状撮影状況
Photo 2 Photographing the simulated deformation

今回は、ルールベースで変状判定を行った。変状記録を優先させるため、高感度設定とし、正常な主ケーブル外装から逸脱しているものを全て検出することとした。その結果、汚れやノンスリップ塗装の珪砂なども変状として判定しており、今後は変状判定の精度を向上させる必要がある。

また、今回の装置仕様では屋外での外乱光の影響は一定程度想定していたが、大がかりなカバーや照明を配置せずに撮影した画像から画像解析のみで変状判定可能な装置を目指し、手動での露光時間調整機能のみ搭載する構成とした。しかし、実橋試験において、晴天状態から曇天により太陽光が遮られる状態が短時間に繰り返し変化する状況下では、主ケーブルの側面範囲を撮影した画像において、写真-3のように一部白飛びをしてしまう状態が確認されたため改良を検討する必要がある。



写真-3 主ケーブル自動合成画像
Photo 3 Auto-composite image of the main cable

5. 実橋試験結果を踏まえた検討課題

実橋試験結果を踏まえた主な課題を下記に整理する。

(1)可搬性

台車部重量が約40kgと重く、地上からケーブル上への連続運搬を考慮すると全体的に軽量化を行う必要がある。

(2)走行性

デッドマンブレーキの構造を見直し、解放量の拡大を行う必要がある。また、ハンドロブ間隔の変動に対応するため、車輪及びブレーキへ追従性を持たせ不要な抵抗の削減に努める必要がある。

(3)機能性

白飛び、黒つぶれなど画像データの損失を防ぐため、自動露光調整機能及び影部処理の強化を検討する。

また、変状判定については、より判定精度を向上させるため、AIの導入検討を進め深層学習による判定精度向上を行う必要がある。

6. 今後の取組

本開発検討は、今後明石海峡大橋での実用機の製作並びに運用を予定しており、現場での運用を通してより良い装置への改良、開発について検討を行う。

また、今回開発した台車部はケーブル上での資材運搬にも活用が見込めるものであるため、電動化にも取り組んでいく。

7. おわりに

本稿では、業務効率化のために検討・開発を進めている主ケーブル外装モニタリングシステムの開発について記述した。従来のケーブル作業車による点検と比べ、非常に簡易かつ効率的に点検が可能となった。より良い装置とするための課題は残っているが、海上高所でのケーブル外装点検を画像取得から変状判定、記録、整理、一覧表示までの工程を全て自動化できたことは、点検作業の効率化のみならず、カーボンニュートラルにも寄与するものであり、吊橋主ケーブルの点検管理における課題解決に貢献できれば幸甚である。

また、今後の取組を通してより良い装置を開発し、明石海峡大橋以外の吊橋にも展開を進め、橋梁の維持管理の効率化及び高度化に関する開発を進めていく所存である。

参考文献

- 1) 松田文子他：自動車のブレーキレバーと手の大きさの関係に関する研究一般社団法人日本人間工学会，人間工学33巻，1997

ETC2.0を用いた渋滞情報提供の 精度向上に関する取組

Initiatives to improve the accuracy of traffic congestion information using ETC2.0

入江 桃子
Momoko Irie
保全部 電気通信課

亀谷 貴之
Takayuki Kametani
神戸管理センター 施設課長代理

概要

ETC2.0は、路側に設置された通信アンテナ（以下、「ITSスポット」という）と車載器が双方向通信を行うことで情報提供・収集を行うことができる（図-1）。収集したデータには車両の走行速度などの情報が含まれ、交通管制業務や交通解析に使用するが、データはITSスポット通過時に収集するため、ITSスポットの配置距離などにより、情報の収集にタイムラグが発生してしまう。

今回、AI補正機能を追加し、受信前のデータをAIが予測することで、リアルタイム交通状況を予測することが可能となった。これは早期の渋滞把握、渋滞情報提供の精度向上に寄与するものである。本稿では、ETC2.0及びAI補正機能の仕組みについて述べるとともに、AI補正機能の精度検証結果について報告する。

ETC 2.0 enables the provision and the collection of information through bidirectional communication between vehicle-mounted devices and roadside communication antennas (hereafter referred to as ITS Spots)(Fig.1). The collected data includes information such as vehicle speed, which is used for traffic control operations and traffic analysis. However, since data is collected only when passing an ITS Spot, a time lag in data acquisition can occur depending on the placement distance of the ITS Spots.

This time, an AI correction function has been added, allowing real-time traffic conditions to be predicted by having AI forecast data before it is received. This contributes to early detection of traffic congestion and improved accuracy in providing congestion information. In this paper, we describe the mechanisms of ETC 2.0 and the AI correction function, and report the results of accuracy verification for the AI correction function.

1. ETC2.0の概要と課題

1.1 ETC2.0の概要

ETC2.0では、従来のETCシステムによる「料金収受」機能に加え、「渋滞回避支援」「安全運転支援」「災害時支援」といった情報提供や、特定区間での割引といった新サービスを受けることができる。また、ETC2.0利用者に対してのサービスだけでなく、利用者から車両の走行速度や車両位置の緯度経度（移動位置情報）といった走行履歴データ及びハンドル操作や急ブレーキなどの挙動履歴データを収集することができ、収集したデータ（以降、プローブデータと記載）は交通管制業務や交通解析に使用する。

ETC2.0は、路側に設置されたITSスポットと、ETC2.0対応車載器が双方向通信を行うことで情報提供・収集を行う。車載器はカーナビゲーションと連動して図形、画像及び音声情報などを提供するものが主流である。



図-1 ITSスポット
Fig.1 ITS spot

1.2 ETC2.0の変遷

ETC2.0は、カーナビゲーションと高速・有料道路のETC利用料金収受を連携可能にする、VICS、ETCの機能が一体となったシステムである。ETC2.0利用率は、国土交通省発表のETCの利用状況¹⁾によると、2025年7月時点で37.8%となっている(図-2)。ETC2.0は普及途上ではあるものの、利用率は毎年増加傾向にあり、今後サービスの拡充やETCセキュリティ規格の変更に伴い普及が更に進むものと考えられる。

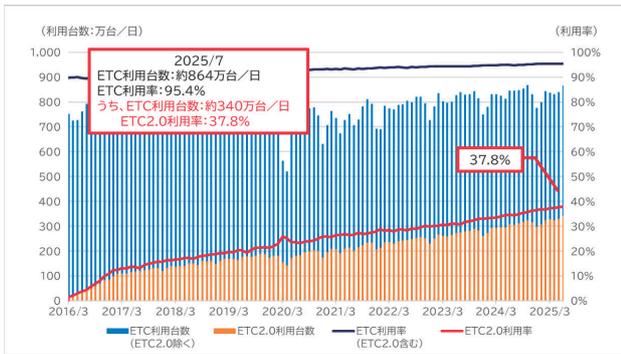


図-2 ETCの利用状況
Fig.2 ETC usage status

1.3 ETC2.0による情報提供・収集

1.1で述べたとおり、ETC2.0はITSスポットと車載器が双方方向通信を行うことで情報提供、収集を行うことができる(図-3)。

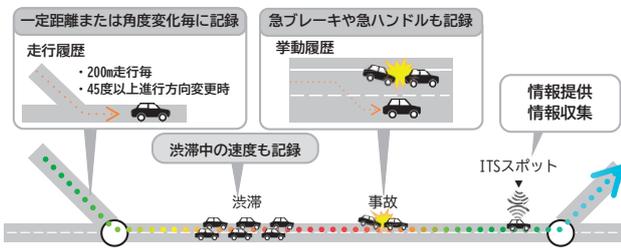


図-3 ETC2.0による情報提供・収集
Fig.3 Information collection and provision using ETC2.0

情報提供内容としては、図形及び音声にて最大約1,000km先の道路交通情報を提供することができ、利用者は長距離ドライブの場合でも早期に遠方までの目的地付近の情報を把握することができる。また、情報を車載器に蓄積し、ITSスポットのないジャンクション分岐やトンネルなど、あらかじめ設定した場所でも情報提供することが可能である。この機能により、例えばITSスポット通過後に登坂のサグ部手前に到達したタイミングで速度低下注意情報を提供することなどが可能である。

収集できるプローブデータとして、走行履歴には時刻、緯度経度、道路種別などのデータが記録されており、200m走行ごともしくは45度以上の進行方向の角度変化があった場合にデータとして蓄積する。挙動履歴情報には、時刻、緯度経度、道路種別に加え、進行方向、速度、

加速度、ヨー角速度が記録される。挙動履歴情報にはデータを蓄積する閾値が設定されており、前後加速度が-0.25G以上、左右加速度が±0.25G以上、ヨー角速度が±8.5deg/sといった場合にデータ蓄積される。

1.4 ETC2.0の課題

ETC2.0の課題としてITSスポット間の距離があり、ITSスポットと車載器の通信時(通過時)に情報収集を行う仕組み上、情報収集にタイムラグが発生することが挙げられる。高速道路においては、通常、ITSスポットをジャンクションの手前も含め、おおむね10~15kmおきに設置するが、図-4のとおり、その間でプローブデータが収集されるまでに時間を要する箇所がある。

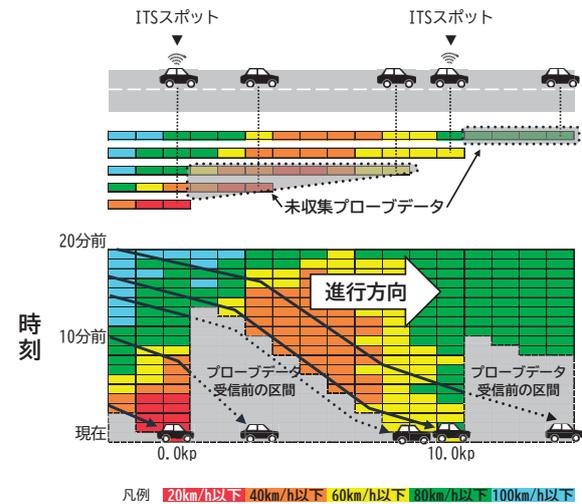


図-4 タイムラグの発生
Fig.4 Probe data time lag

今回整備したAI補正機能では「時速40km/h以下で低速走行あるいは停止発進を繰り返す車列が1km以上継続した状態」を渋滞の定義としているが、時速40km/hの車両の場合、10km離れたデータは15分遅れで収集され、タイムラグのある渋滞情報を提供している。また、渋滞が悪化するほどITSスポットに到達するまでにかかる時間は長くなり、情報収集のタイムラグは大きくなる。タイムラグを改善し、プローブデータを基にした精度の高い渋滞情報を提供するため、今回、AI補正機能を追加した。AI補正機能により、受信前のプローブデータを予測し、渋滞情報をリアルタイムに把握することが可能になった。

ETC2.0のその他の課題としては、ETC2.0利用率は約40%と普及途上であることや、本四高速においては、全てのジャンクションやインターチェンジ手前にITSスポットが設置されているわけではなく、情報提供やプローブデータの収集ができない区間が存在することなどが挙げられる。

2. 本四高速におけるETC2.0とAI補正機能

2.1 本四高速のETC2.0

本四高速のETC2.0のシステム構成を図-5に示す。ITSスポットと接続し情報提供・収集を行う設備として、ITS中央局がある。走行車両から収集したプローブデータは本四高速内で解析を行うほか、国土交通省などの関係機関にも送信されている。

本四高速内でプローブデータを解析するために、プローブ解析設備がある。プローブ解析設備は2022年度に整備され、当初はITS中央局設備からのプローブデータのみを基に解析を行っていた。今回AI補正機能で交通量及び交通規制などのイベントデータを使用するため、また、今後、プローブ解析結果を基にした渋滞情報を道路情報板で提供するため、交通管制中央局との接続を追加している。なお、図中の太線部分は今回のAI補正機能追加に関する改修を行った箇所である。



図-5 システム構成
Fig.5 System configuration diagram

2.2 AI補正機能とAI学習によるデータ補正

(1) AI補正機能の仕組み

AI補正機能では、プローブデータによる実際の渋滞パターンを学習することでプローブデータを受信していない区間の情報をシミュレートし、リアルタイムなデータとして加工、交通状況の予測を行う。以下に事前学習とリアルタイム予測について説明する。

(2) 事前学習

プローブ解析設備は1日ごとに自動で前日1日分の交通量データ、イベントデータ（車線規制、事故などの交通状況）、プローブ走行履歴を学習用データとし、KV（交通密度-車両速度）パラメータ及びCA（セルオートマトン）パターン（図-6）の学習を行う。

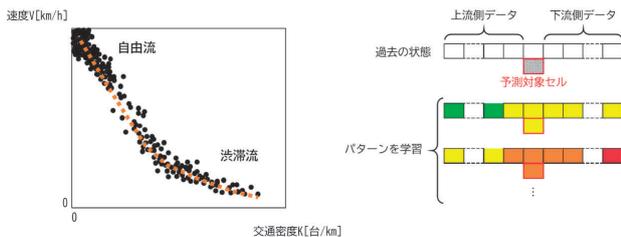


図-6 KVパラメータ（左）及び
CAパターン（右）のイメージ
Fig.6 KV parameters (left) and CA pattern (right)

KVパラメータとは交通密度K（台/100m）と車両速度V（km/h）の関係性を学習したもので、交通量データから得られる交通量Q（台/分）と車両速度Vを基に自由流と渋滞流の交通密度Kを算出している。

CAパターンとは過去の渋滞状況とその時の交通状況、上流からの流入交通量（交通密度）との関係性を学習したものである。

(3) KVパラメータ及びCAパターンを用いた予測

最新の交通量データとKVパラメータから、流入交通量を算出する。最新の渋滞イベントデータ、プローブ走行履歴及び流入交通量を基に、過去の学習データで最も近似するCAパターンを検索する。検索されたCAパターンによって、過去時間帯からプローブデータ未受信区間の状況を予測し埋めていくことで、リアルタイム交通状況を予測する（図-7）。

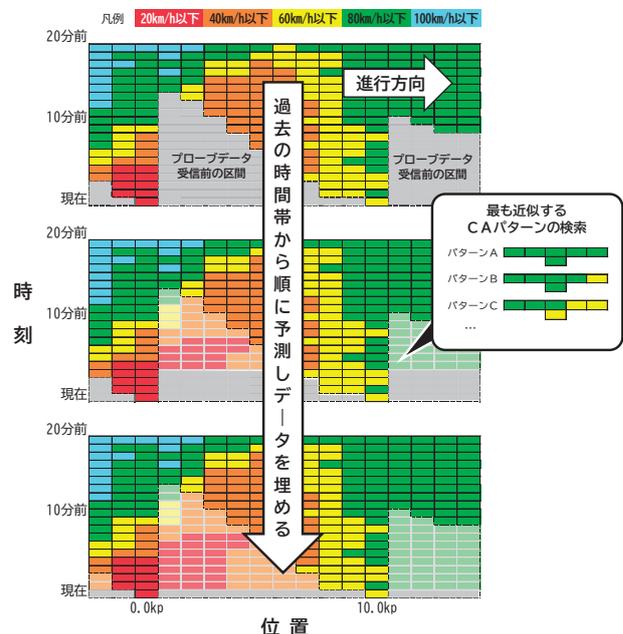


図-7 CAパターンによる予測
Fig.7 Prediction by CA pattern

2.3 AI補正精度の検証

プローブデータを基にした精度の高い渋滞情報を提供するため、AI補正機能を追加しリアルタイムの交通状況を予測することが可能となったが、予測結果がどの程度正確か、今年度のゴールデンウィーク期間のデータを用いて、所要時間と渋滞把握に着目し検証を行った。

(1) 検証区間

検証区間は2025年5月5日（月）14時～5月6日（火）0時 神戸淡路鳴門自動車道上り線 布施畑JCT～西淡三原IC間とした。これは、AI補正機能追加後、最も長距離の渋滞が発生した区間である。

(2) 所要時間精度

- 1) 実測値（収集されたプローブデータによる値）と補正值（AI補正機能により予測された値）の比較

図-8にプローブ解析によって求められた布施畑JCT

～西淡三原IC間の所要時間（実測値，補正值）を示す。本稿では，渋滞ピーク付近を渋滞流，渋滞の立上り・立下り付近を混雑流と定義し，それぞれで実測値と補正值の誤差率を求めた。プローブ解析による所要時間は，渋滞流では平均誤差率が13.1%，混雑流の誤差率が10.1%であった。図からは，渋滞延伸時には所要時間が短く，渋滞縮小時には所要時間が長く予測されている箇所が多いことがわかる。

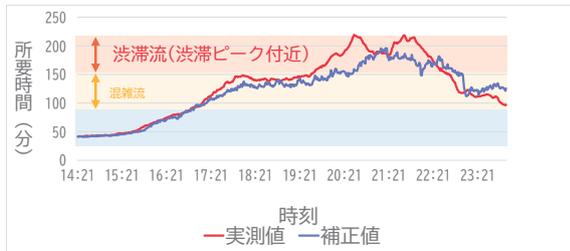


図-8 所要時間比較（実測値，補正值）
Fig.8 Comparison of travel time (actual value, prediction value)

2) 既存設備との比較

既存設備を用いた所要時間把握の方法として，埋設ループ式交通量計測データによる把握がある。交通量計測データにより算出された所要時間とAI補正機能により予測された所要時間を比較した結果，AI補正機能による所要時間把握精度は交通量計測と同等以上という結果が得られた（図-9）。

交通量計測データは計測設備設置箇所ピンポイントの情報だが，プローブデータは連続した情報であり，より正確で，情報量が多いため精度が向上したものとする。

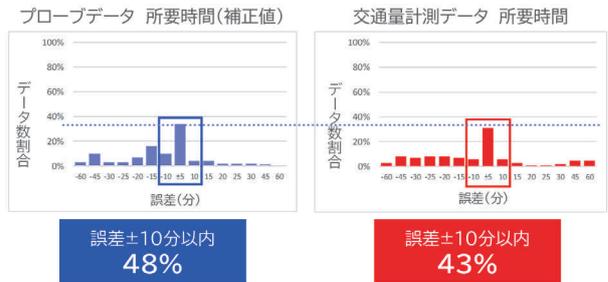


図-9 所要時間比較（補正值，交通量計測データ）
Fig.9 Comparison of travel time (prediction value, traffic data)

(3) 渋滞イベント精度

プローブ解析渋滞イベントの実測値（収集されたプローブデータから検出された渋滞）と補正值（AI補正結果から検出された渋滞）を比較する。図-10に示すグラフは横幅が渋滞長を表しており，例えば22時のデータでは，実測値によると垂水JCTから北淡IC付近まで渋滞が発生している。補正值では垂水JCTから北淡ICと津名一宮ICの間地点付近までが渋滞と判定されている。

図中の黒太線で囲った箇所は実測値と補正值が一致している箇所である。補正值の渋滞再現率（渋滞が発生している箇所を渋滞と判定できた率）は95%，渋滞適合率（渋滞と判定した箇所のうち，実際に渋滞が発生していた率）は92%であった。図からは，渋滞初期や渋滞縮小時に誤差が発生していることが読み取れる。

(4) 精度低下要因の考察

AI補正精度の低下について，事故などの突発事象による渋滞が要因の一つと推察し，所要時間（実測値）の増加により誤差が大きくなっている時間帯の突発事象有無を交通管制イベント履歴より確認した。

イベント履歴によると，19:29～21:10に舞子トンネル内第一走行車線にて故障車が発生しており，これは所要時間（実測値）が増加した時間帯とおおむね一致している（図-11）。一方で，21:25～22:00頃にも所要時間

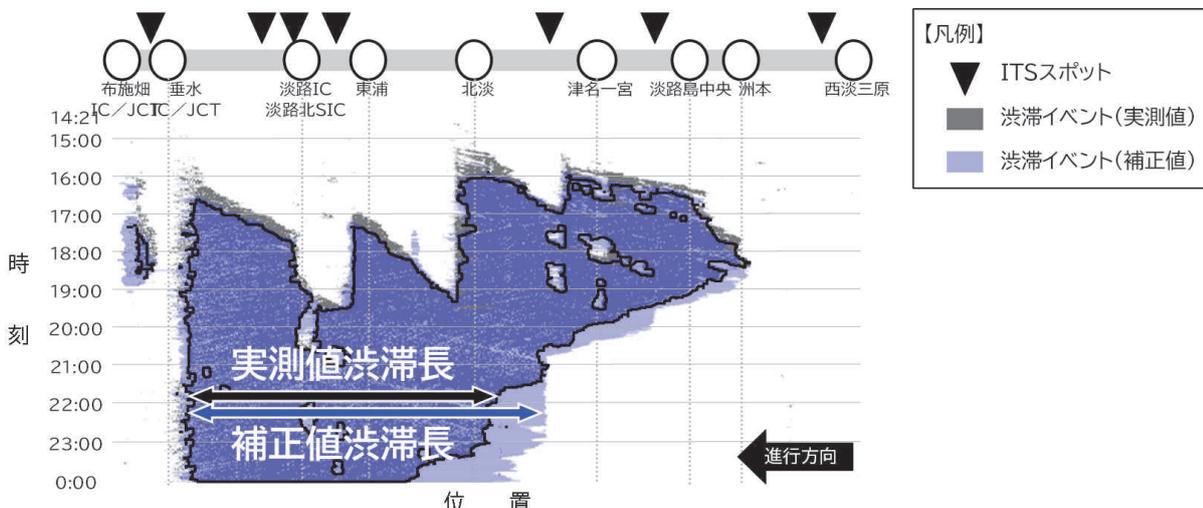


図-10 渋滞イベント比較（実測値，補正值）
Fig.10 Comparison of traffic congestion events (actual value, prediction value)

(実測値)が増加しているが、こちらについては所要時間が増加するような事象は確認できなかった。

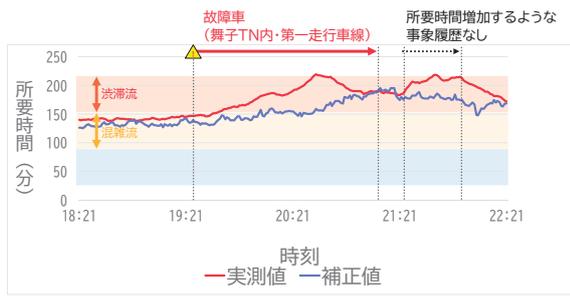


図-11 所要時間の増加と発生事象
Fig.11 Increased travel time and incidents

突発事象による誤差については、今後AI学習を継続することで精度向上していくものとする。精度低下要因が判明していない箇所については、要因となった事象を特定し、AI学習対象に取り込むことができれば精度向上するものとする。

(5) AI補正機能の自動学習の継続

今回の取組で整備したAI補正機能には、予測精度を向上するためのAI自動学習機能を実装しており、現在も1日1回のAI自動学習は継続して動作している。学習を行うほど予測に使用するCAパターンが蓄積、更新され、精度は向上する。現在、夏季繁忙期間のデータを用いて精度検証を実施しており、今後、年末年始期間においても再度精度検証を行い、引き続き精度の向上有無の確認を継続していく。

2.4 路線端における渋滞イベント検知の課題

検証を行うなかで、路線端において確認された渋滞イベント誤検知について報告する。

最終ITSスポットから路線端までの区間は、通常はプローブデータが収集できない。しかし、今回の検証で、部分的に路線端のプローブデータが収集されており、そのデータにより渋滞誤検知が発生していることが判明した。

一例として、図-12に神戸淡路鳴門自動車道下り線路線端(鳴門北IC~鳴門IC)を示す。神戸淡路鳴門自動車道下り線の最終ITSスポットは85.779KPに設置されており、鳴門ICまでの区間(85.779KP~89KP)は通常、プローブデータが収集できないが、丸枠(実線)で囲ったとおり部分的に収集されているデータがある。また、丸枠(破線)で囲ったとおり渋滞誤検知が発生している。

路線端のプローブデータは、短期間でUターンした車両から収集されたものであることが確認できた。例えば図-13のとおり、上り線を走行した車両がUターンして下り線のITSスポットに到達した際に、上り線路線端のプローブデータが収集されている。

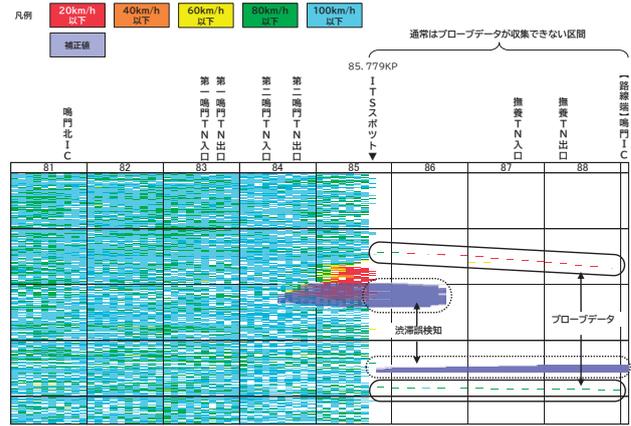


図-12 路線端における渋滞誤検知
Fig.12 False detection of congestion at the end of the road

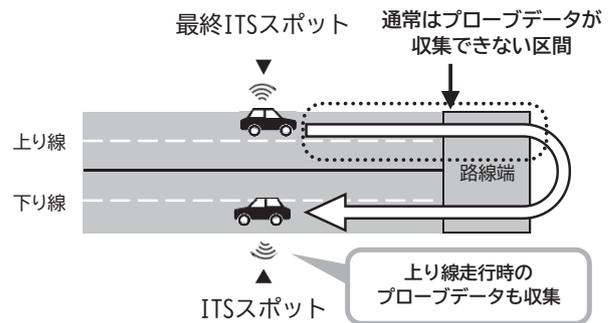


図-13 Uターン走行によるプローブデータ収集
Fig.13 Probe data collection by U-turn driving

短期間でUターンする車両としては、道路維持作業車両、管理隊車両、警察車両、路線バスなどが考えられる。該当する車両は台数が少なく、プローブデータのリアルタイム性もないことから、AI補正機能の精度に及ぼす影響が大きく、渋滞誤検知が発生している。

解決方法として、路線端においては既設埋設ループ式交通量計測データを用いて渋滞予測を行うことを検討している。なお、Uターン車両のプローブデータを除外することも案として考えられるが、他機関の道路維持作業車両などの車両IDの把握が困難なこと及び警察車両の車両IDが不明(開示不可)のため、車両ID以外の要素での除外もしくは除外以外の解決方法の検討が必要である。

3. 今後の計画

3.1 プローブ解析結果を基にした道路情報板での情報提供

今後、AI補正機能により予測されたリアルタイム交通状況を基に、交通管制システムから道路情報板へ渋滞情報提供の制御(自動/半自動)を行う機能を追加予定である。また、これまでの提供内容に加え、所要時間や渋滞の伸縮傾向(延伸/縮小)をシンボルで表示する情報を提供することを予定しており、利用者の行動選択の一要素になると考える(図-14)。

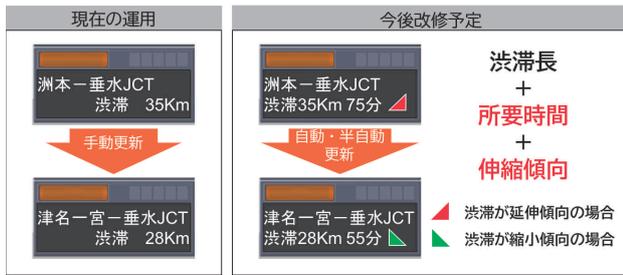


図-14 道路情報板による精度の高い渋滞情報の提供
 Fig.14 Providing highly accurate traffic congestion information using road information boards

3.2 ETC2.0情報提供内容の改修

今回、精度検証の対象とした区間のうち、上り線の垂水JCT分岐～舞子トンネル付近は垂水JCTの垂水第二料金所方向（第二神明道路及び阪神高速3号神戸線方面）へ向かう交通量が多く、舞子トンネル内のサグ部の影響により、渋滞が発生しやすい。今年度7月に、上り線の垂水JCT～津名一宮ICの間でETC2.0を活用して垂水JCT分岐部の渋滞発生情報やサグ部の速度低下の注意情報（図-15）を提供するよう改修を行っており、渋滞車線の回避や経路変更の意識付けとなり渋滞軽減につながるか、繁忙期間などのデータを利用して利用者の行動変容を検証する。

この行動変容を検証して、詳細な渋滞発生情報やサグ部の注意情報による情報提供の効果を確認し、今後、道路情報板での情報提供の追加や渋滞予測技術の高度化に向けた検討を進める。



図-15 提供優先順位の変更及び提供情報の追加
 Fig.15 Changes in provision priority and addition of information

4. まとめ

本稿では、ETC2.0の課題を解決するためのAI補正機能追加について述べた。AI補正機能によりリアルタイム交通状況を予測することが可能となり、渋滞の早期把握、渋滞情報精度向上に寄与するものとなったものとする。

AI補正精度については、5月5日（月）神戸淡路鳴門自動車道上り線 布施畑JCT～西淡三原IC間のデータで検証を行った結果、所要時間については、交通量計測データから算出する場合より誤差が少なくなった。渋滞イベントについては、再現率、適合率ともに90%以上であった。精度低下の要因としては突発事象の学習不足や路線端における誤検知と推察される。

現在、管制室で作成する渋滞イベントは、管理隊からの現地渋滞情報などにより手入力で作成しており、プローブ解析設備AI補正機能を利用することで、管制室及び管理隊の負担軽減につながることを期待できる。また、道路利用者への精度の高い情報提供により早期の渋滞解消・混雑緩和などにつながることを期待できるため、学習データの蓄積による精度向上の有無を引き続き確認するとともに、精度向上に必要な改修の検討や更なる渋滞対策検討に取り組んでいく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通省：ETCの利用状況,
<https://www.mlit.go.jp/road/yuryo/etc/riyou/index.html>, 2025.9

センシング技術を活用した橋梁点検補修用作業車の 安全性能高度化への取組

Initiatives for Enhancing the Safety Performance of Maintenance Vehicles for Bridge Inspection and Repair Using Sensing Technologies

西山 貴偉
Takayori Nishiyama
坂出管理センター 施設課

河野 正樹
Masaki Kono
しまなみ尾道管理センター 施設課長
前 坂出管理センター施設課長

松葉 真人
Masato Matsuba
本四高速道路ブリッジエンジニア株式会社
機械技術センター工務課長

概要

長大橋梁の保全作業を安全かつ効率的に施工するには、橋梁点検補修用作業車が不可欠である。作業車の安全かつ適切な運用にあたっては、ガイダンス式操作盤などによる誤操作防止機構の導入や、学科と実技による安全運転教育の実施により、安全性の確保と向上を図ってきた。しかし、作業車の進行方向障害物の確認不足などによるヒューマンエラーに起因する接触事故を防止することは困難であった。このため、瀬戸大橋ではヒューマンエラーによる接触事故防止を目的に、最新のセンシング技術を活用した新たな安全装置の導入を検討し、更なる安全性能の高度化に取り組んだ。

本稿では、作業車の安全性能高度化に向けたセンサ方式の選定、検出性能の確認及び実橋試験による実用性の確認などの取組について報告する。

To ensure the safe and efficient execution of maintenance operations on long-span bridges, the maintenance vehicle is indispensable. In order to achieve the safe and proper operations of the maintenance vehicle, various measures have been implemented, including the introduction of error-prevention mechanisms such as guided control panels, as well as safety training programs incorporating both theoretical and practical components.

However, it has been difficult to prevent contact accidents caused by human error, such as insufficient confirmation of obstacles in the travel direction of the vehicle. To prevent these accidents, efforts have been undertaken on the Seto-Ohashi Bridges to further enhance safety performance by evaluating the effectiveness of newly introduced safety devices that utilize state-of-the-art sensing technologies, with the goal of preventing contact accidents attributable to human error.

This paper presents an overview of the initiatives aimed at improving the safety performance of the maintenance vehicle, including the selection of appropriate sensor technologies, verification of detection capabilities, and validation of practicality through on-site testing using an actual bridge.

1. はじめに

本州四国連絡橋（以下、「本四連絡橋」という。）は、吊橋や斜張橋などの大規模な鋼橋群から構成されており、その長期的な健全性を確保するためには、定期的な点検及び補修塗装など（以下、「保全作業」という。）が不可欠である。これらの作業を効率的かつ安全に実施するため、本四連絡橋では建設当初より各橋梁構造に応じた専用の移動足場として橋梁点検補修用作業車（以下、「作業車」という。）を開発し設置している。作業車の安全かつ適切な運用にあたっては、フェイルセーフ設計

やフルプルーブ設計によるハード対策に加え、安全運転教育や支障物マップの整備といったソフト対策を講じ、安全性の確保と向上を図ってきた。しかし、作業車の進行方向障害物の確認不足などによるヒューマンエラーに起因する接触事故を防止することは困難であった。このため、瀬戸大橋ではヒューマンエラーによる接触事故防止を目的に、最新のセンシング技術を活用した新たな安全装置の導入を検討し、さらなる安全性能の高度化に取り組んだ。

本文では、作業車の安全性能高度化に向けたセンサ方式の選定、検出性能の確認及び実橋試験による実用性の確認などの取組について報告する。

2. 作業車の概要

2.1 作業車の種類

主要構造部材が鋼である本四連絡橋では、保全作業を効率的かつ安全に実施するため、建設当時から吊橋や斜張橋などの橋梁構造に応じた専用の移動足場として作業車を開発し設置している(写真-1)。瀬戸中央自動車道には、桁外面作業車60台、桁内面作業車24台、塔作業車9台、ケーブル作業車4台の4機種、計97台の作業車を設置しており、本四連絡橋における保有台数の過半数を占める。



写真-1 作業車の種類

Photo 1 Types of Maintenance vehicle

2.2 作業車安全対策の現況

作業車の構造及び運転操作は、トラス桁のように桁部材が多くなると複雑になり、接触事故のリスクが高まる。このため、作業車には事故防止を目的として、ハード面ではフェイルセーフ設計に基づく加速度検出装置などによる自動停止機能、並びにフルプルーフ設計に基づくガイダンス式操作盤などによる誤操作防止機構を導入している。また、ソフト面では作業車の運転者をJB本四高速が主催する安全運転教育の修了者に限定することで、運転操作に必要な技量と知識を教授している。更に、最新の現場状況に対応するために、近接作業中の作業車や一時的な仮設足場などを記載した支障物マップを関係者間で共有している。このように、作業車の運用はハードとソフトの両面から安全対策を講じ、安全性の確保と向上を図っている(写真-2)。



写真-2 作業車の安全対策例

Photo 2 Examples of safety measures for maintenance vehicles

2.3 桁作業車の構成と運転操作方法

本四連絡橋の補剛桁には、補剛桁外周部に接近する桁外面作業車と、補剛桁内部に接近する桁内面作業車が設置されている。ここでは、瀬戸大橋を例に記述する。

桁外面作業車は、下面作業台及び側面フレームから構成され、橋軸方向に走行する(図-1)。側面フレームには、昇降及びトラス桁内外に移動する伸縮足場が設置されており、トラス桁外周の主構及び下横構などに接近できる。橋軸方向への走行操作は、下面作業台上の主操作盤で行い、伸縮足場の昇降及び伸縮操作は主操作盤、伸縮足場歩廊上操作箱、又は伸縮足場内の操作箱で行う。

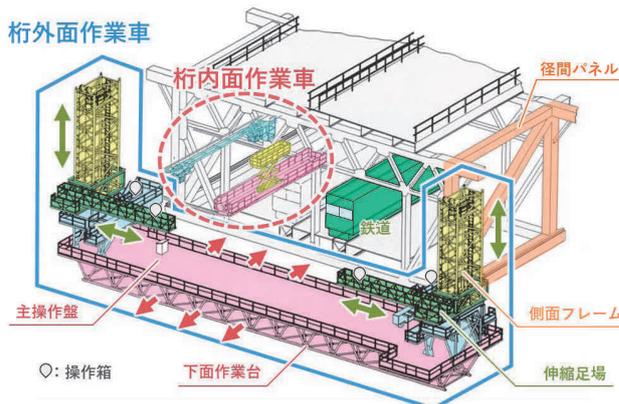


図-1 桁外面作業車

Fig.1 Outside girder maintenance vehicle

桁内面作業車は、主に横行台車と移設台車から構成される(図-2)。横行台車は橋軸直角方向に横行し、その上の昇降台車が橋軸方向に走行及び鉛直方向に昇降する。移設台車は、横行台車を吊り上げ、小組トラス内を橋軸方向に走行するクレーンであり、横行台車を所定の径間パネルで吊り降ろして設置する。各台車の動作を組み合わせて鋼床版裏面などに接近できる。横行台車及び昇降台車の運転操作は昇降台車上の操作箱で行い、移設台車の運転操作は運転室内の操作箱で行う。

作業車の運転操作にあたっては、運転者だけでは桁部材などによる死角が生じ、障害物を確認できないため、確認者と連携して接触防止を図り、安全確保に努めることを運転マニュアルで規定している。

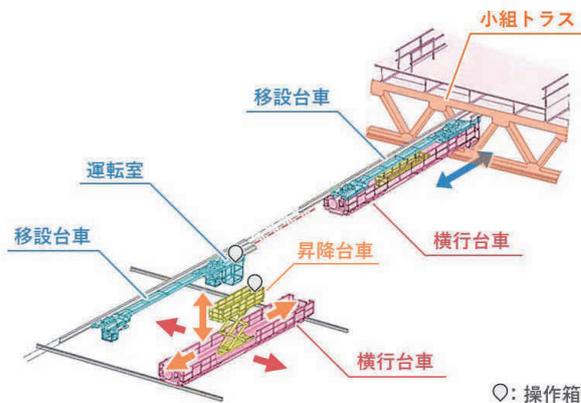


図-2 桁内面作業車

Fig.2 Inside girder maintenance vehicle

3. 作業車事故事例と安全上の課題

3.1 事故件数の推移

本四連絡橋の全作業車を対象に、2004年から2023年度までの20年間に発生した38件の事故件数を年度ごとに集計したものを図-3に示す。2007年度及び2008年度が5件と最も多く、これを受け2008年度より作業車の運転体制と責任の明確化を行うなど、運用方法を大幅に見直したが、2009年度以降も年間2件程度を推移している。

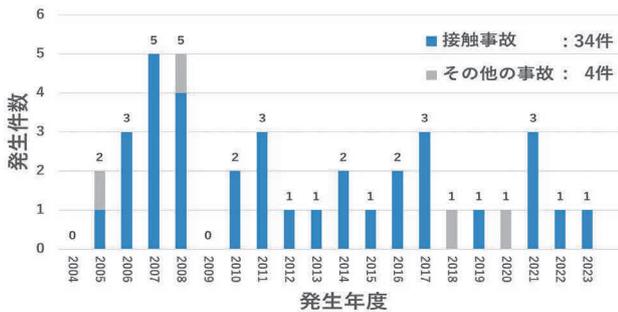


図-3 事故件数の推移

Fig.3 Trend in the number of accidents

3.2 接触事故事例

作業車事故のなかでも、大多数を占める接触事故の代表的な事例を紹介する。

- (1) 南備讃瀬戸大橋桁外面作業車で中央径間中央を走行中、進行方向上方の目視確認を怠り主ケーブルに架設していたケーブル作業車のケージと側面フレーム頂部が接触し、両作業車が損傷した(図-4)。

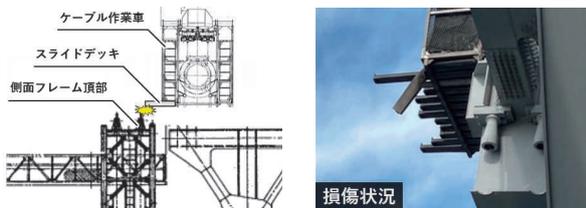


図-4 事故事例①

Fig.4 Case Study①

- (2) 明石海峡大橋桁外面作業車で伸縮足場をトラス桁内部に差し込んで補修塗装を実施中、伸縮足場の手摺と主構上弦材下面の添接部ボルトの隙間を見誤り、接触により手摺が損傷した(図-5)。

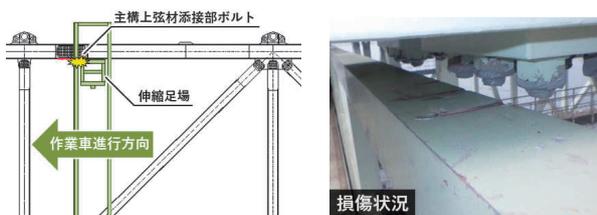


図-5 事故事例②

Fig.5 Case Study②

- (3) 下津井瀬戸大橋桁内面作業車の移設台車で小組トラス内を走行中、上路床組から垂下していたロープを見落とし、作業車の集電設備に接触させ、集電子とトロリー線を損傷した(写真-3)。

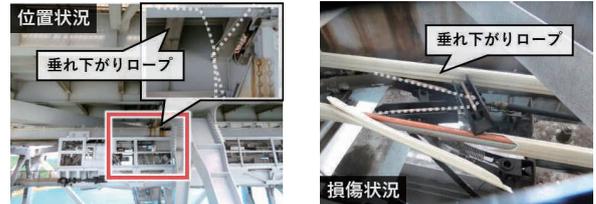


写真-3 事故事例③

Photo 3 Case Study③

3.3 作業車運用における安全上の課題と対応方法

接触事故の多くは、「思い込み」「失念」「確認不足」といったヒューマンエラーに起因する。また、目的箇所と作業車の係留位置が離れている場合、同一構造の桁部材が続く単調な走行空間での連続運転により、「慣れ」による集中力の低下も要因となる。これまでハード・ソフト両面から対策を講じてきたが、事故は依然として発生しており、更なる安全性能の向上が求められた。

そこで、ヒューマンエラーによる事故防止を目的に、過去の事例と作業車の形式を基に、瀬戸大橋の吊橋・斜張橋における接触防止が要求される動作(以下、「接触防止対象動作」という)を以下のとおり仮定し、センシング技術を活用した新たな安全装置の導入を検討した。

- ① 桁外面作業車の走行動作及び伸縮足場の昇降・伸縮動作
- ② 桁内面作業車移設台車の走行動作

4. センシング技術を活用した安全装置の検討

4.1 センサ方式の比較検討

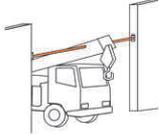
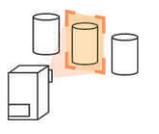
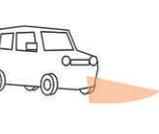
近年のデジタル技術の進展により、センシング技術は多くの産業分野で活用されており、とくにICT建設機械や自動運転技術に注目が集まっている。

本検討では、作業車の接触事故防止を目的に、建設機械、自動車、ロボットなどで活用されている各種センサ方式の特性と性能を比較した(表-1)。先述の接触防止対象動作の安全装置にセンシング技術を導入する場合、(a)広範囲かつ高精度に検出範囲の設定ができること、(b)直射日光及び気候、明暗などの影響を受けにくい環境性能、(c)ロープ及びメッシュなどの細かなものでも正確に検出できる検出性能が求められる。比較検討及び実橋試験の結果、要求性能を満たす方式として測域センサを採用した。

測域センサは検出範囲を2段階に設定可能で、第1段階では警告による注意喚起、第2段階では動作停止による制御が可能となり、安全性の一層の向上が期待される。各対象動作の検討結果を次項に示す。

表-1 センサ方式の比較検討

Table 1 Comparison and evaluation of sensor methods

種類	光電センサ方式	超音波センサ方式	画像判別センサ方式	ミリ波センサ方式	測域センサ方式 (LiDAR)	感圧センサ方式 (パンパースイッチ)
特徴	光の反射・遮光で生じる光量の変化を検出する  例・洗車機の車体検出 ・製品の不良品検知	超音波を用いて物体との距離を測定する  例・車の衝突監視 ・魚群探知機	カメラを用いて物体の有無や違いを判別する  例・製品の外観検査 ・製品の数量検査	ミリ波を用いて物体の距離等を測定する  例・自動運転自動車 ・ドローンの周囲認識	レーザーを用いて物体の距離等を測定する  例・地形計測 ・荷台の積載量計測	接触・衝突することで物体を検出する  例・ロボットの衝突緩和 ・自動の扶まれ検知
要求性能	検出範囲 △ ①広範囲に検出するには、複数台のセンサが必要	△ ①広範囲に検出できる ②範囲設定の精度が低い	△ ①範囲設定の精度が低い	○ ①広範囲に検出できる ②範囲設定の精度が高い ③三次元的に検出できる	○ ①広範囲に検出できる ②範囲設定の精度が高い ③三次元的に検出できる	△ ①広範囲に検出するには、複数台のセンサが必要
	環境性能 △ ①ミスト・汚れに強い ②光軸の調整が必要	△ ①ミスト・汚れに強い ②温湿度・風に弱い	× ①気候・明暗等に弱い ②同色である桁部材では応答速度に影響を受けやすい	○ ①気候・明暗等に強い	○ ①気候・明暗等に強い	× ①気候・明暗等に強い ②一般に屋外向きでない
	検出性能 △ ①材質の影響を受けない ②小さい物は検出しにくい	○ ①材質の影響を受けない	× ①数量・形状を判別可能 ②小さい物は検出できない	× ①材質の影響を受けない ②メッシュを検出できない	○ ①材質の影響を受けない	△ ①検出するには、物体との接触が必要となる
評価	△	△	×	×	○	×

4.2 桁外面作業車の走行動作及び伸縮足場の昇降・伸縮動作へのセンサ適用検討

(1) 現場条件及び要求性能

桁外面作業車の走行動作に対する接触事故を防止するため、作業車の形状、構造及びトラス桁との位置関係を調査し、現場条件及び要求性能を以下のとおり整理した。

- ① トラス桁外周を取り囲んで走行するU字型の桁外面作業車は、トラス桁近傍の主ケーブルで作業中のケーブル作業車や近傍に設置された仮設足場が障害物となる。このため、作業車の形状に合わせて検出範囲を広範囲に設定できる機能が必要となる。
- ② 伸縮足場は桁内部へ差し込んだ状態のまま昇降するため、伸縮足場昇降台車フレームにセンサを設置する場合、伸縮足場の伸縮量にあわせて、センサの検出範囲を変更させる機能が必要となる。

(2) センサ方式の適合性

前項の現場条件と表-1に示したセンサ方式の適合性を確認した結果、線形状の光を投光する光電センサや検出範囲を高精度に設定できない超音波センサでは要求性能を満足できない。一方、測域センサは走査角190度の水平面にレーザー光を放射し、有効半径30m程度の計測範囲内で検出範囲を任意に設定できる(図-6)。このた

め、適切な設置位置を選定すれば障害物の正確な検出が期待できる。なお、測域センサなどはあらかじめ設定された検出範囲でしか検出できないため、伸縮足場の伸縮量に対応するためには複数台のセンサが必要となる。この課題に対し、測域センサとレーザー距離計を併用したセンサフュージョン方式で検討した。本方式はレーザー距離計で変化する伸縮量を常時計測し、計測結果にあわせてあらかじめ設定された検出範囲パターンを自動選択することで、伸縮足場の伸縮に追従できるため、設置台数の削減が可能となる(図-7)。また、伸縮足場の両側部に測域センサを設置し、検出範囲を垂直かつ広範囲に設定することで、障害物となりうる進行方向、両側部並びに上下方向の桁部材などの障害物を検出可能となる。

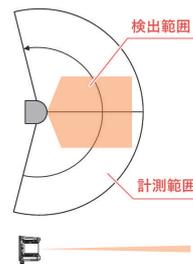


図-6 測域センサ
Fig.6 Laser range finder

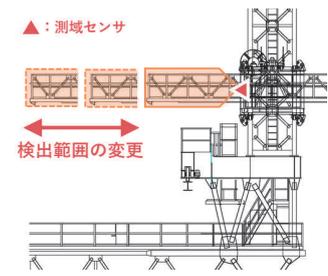


図-7 伸縮足場の検出範囲
Fig.7 Detection range of
Extension platform range

(3) 実橋試験

桁外面作業車の進行方向に仮設した障害物を、下面作業台、側面フレーム基部及び伸縮足場に設置した測域センサで正確に検出できるか、実橋試験を実施した(図-8)。試験の結果、各測域センサでは桁部材などを誤検出することなく、障害物を正確に検出できた。伸縮足場においても、センサーフュージョン方式により伸縮量に追従し、検出範囲を適切に自動選択できた。これらの結果より、東西側面フレーム基部に2台、下面作業台両進行方向に2台、東西伸縮足場に測域センサ4台並びにレーザー距離計2台を設置することで、先述の要求性能を満足し実用化が可能と判断した。

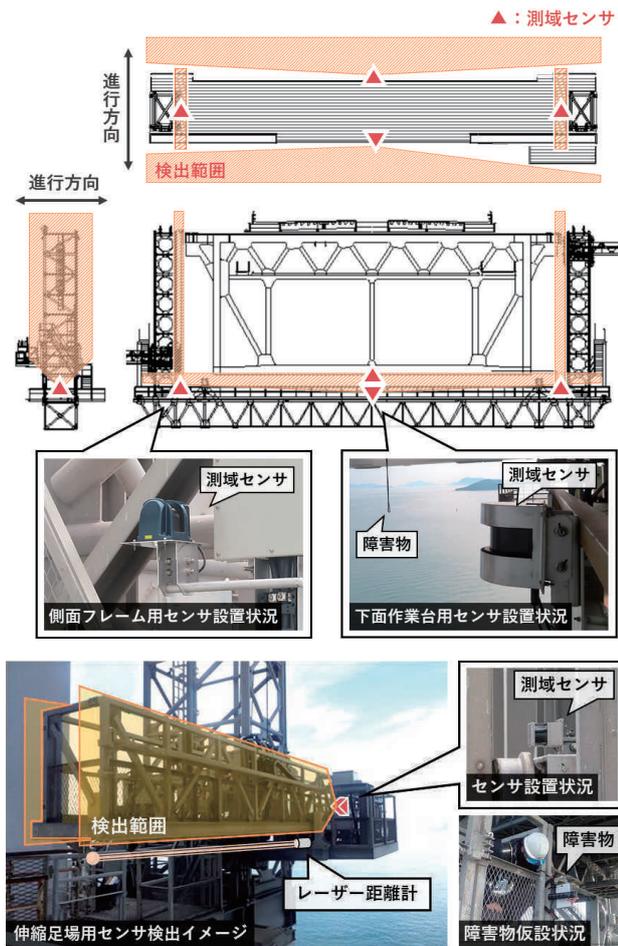


図-8 桁外面作業車の実橋試験状況

Fig.8 Field test status of outside girder maintenance vehicle

4.3 桁内面作業車移設台車の走行動作へのセンサ適用検討

(1) 現場条件及び要求性能

桁内面作業車移設台車の走行動作に対する接触事故を防止するため、作業車の形状、構造及びトラス桁との位置関係を調査し、現場条件及び要求性能を以下のとおり整理した。

① 移設台車の運転操作は片側に設置された運転室で行うため、運転室側への走行時は運転者が単独で安全確認と運転操作を行う必要がある。他方への走行時

は横行台車による死角が生じ、運転者のみでは進行方向の障害物を確認できない。このため、移設台車の両進行方向に検出範囲を設定する必要がある。

② 移設台車走行時には小組トラス内の走行空間全周から障害物の侵入が懸念されるため、小組トラスの形状に合わせた検出範囲を設定する必要がある。

(2) センサ方式の適合性

前項の現場条件と表-1に示したセンサ方式の適合性を確認した結果、走行空間の形状から検出範囲は三角形となり、センサの必要台数及び設置方法を考慮すると、進行方向に対して面形状で障害物を検出できるセンサ方式が望ましい。このセンサ方式は、画像判別センサ方式と三次元計測が可能な3D測域センサ方式がある。画像判別センサ方式では、桁部材が同一構造で複雑かつ同色であるトラス桁内において、カメラのオートフォーカスに時間を要し障害物検出の遅延が危惧される。また、検出性能も対象物のサイズに影響されやすく、ロープ及びメッシュなどの障害物は認識が困難であり、適用できないと判断した。一方、3D測域センサ方式は、小組トラス形状に合わせた検出範囲の設定が可能で、移設台車の両進行方向に設置により、小組トラス内全周からの障害物の正確な検出が期待できる。

(3) 実橋試験

移設台車の走行空間に仮設した障害物を、移設台車の進行方向に設置した3D測域センサで正確に検出できるか、実橋試験を行った(図-9)。試験の結果、移設台車の進行方向に設置した3D測域センサで桁部材などを検出することなく、障害物を正確に検出できた。これらの結果から、移設台車の両進行方向に各1台の3D測域センサを設置することで、先述の要求性能を満足し実用化が可能と判断した。

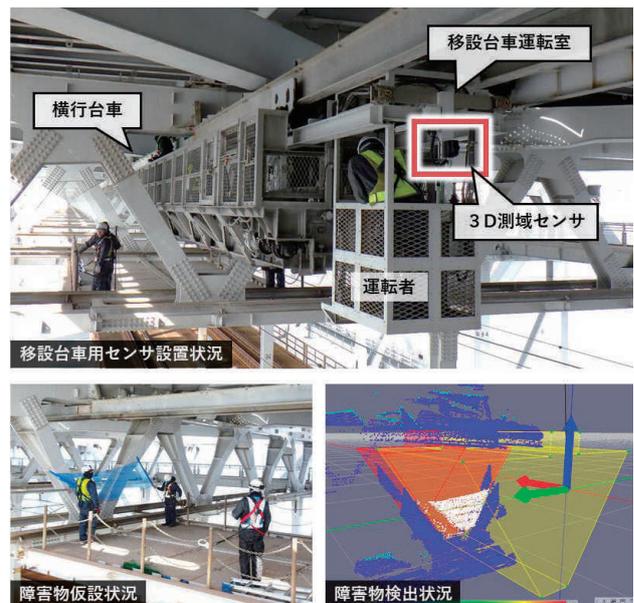


図-9 桁内面作業車の実橋試験状況

Fig.9 Field test status of inside girder maintenance vehicle

5. 安全装置導入により期待できる効果

過去に発生した38件の事故事例を対象に、センシング技術を活用した新たな安全装置（以下「本安全装置」）導入による効果を検証した。

導入効果は、(a)事故事例の発生状況と原因の分析、(b)本安全装置による事故防止の可否判断、(c)低減可能な事故件数と故障停止時間の試算により検討した（図-10、11）。検討結果は以下のとおりである。

- ① 事例の約90%（34件/38件）は作業車使用中の接触事故であり、多くが思い込みや確認不足などのヒューマンエラーに起因していた。
- ② 本安全装置により、接触事故の約60%（19件/34件）の低減が見込まれ、既往技術対策と併せれば約90%（30件/34件）までの事故低減が期待できる。
- ③ 接触事故により構造フレームを損傷した場合、修繕には3～13か月を要することから、事故回避により故障停止時間の短縮も見込まれる。

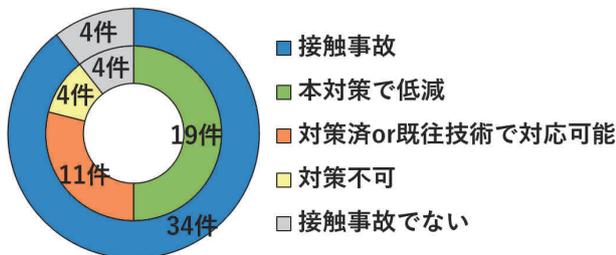


図-10 低減が見込まれる事故発生件数

Fig.10 Expected reduction in the number of accidents

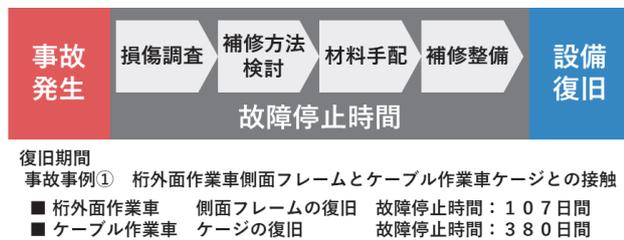


図-11 故障停止時間

Fig.11 Downtime

6. 改造と試運転結果

以上の試験などの成果を受け、北備讃瀬戸大橋で桁外面作業車及び桁内面作業車に本安全装置を搭載し、実橋での保全作業を通じて作業性と安全性能の検証を行った。その結果、以下のとおり実運用上の問題は確認されず、良好な性能を確認した。

- ① ロープやネットなどの障害物を検出後、十分な余裕をもって停止可能であることを確認した（表-2）。
- ② 500mを超える長距離走行でも、桁部材などを誤検出することなく安定動作を維持することを確認した。

表-2 センサ検出範囲及び作動状況

Table 2 Sensor detection range and operating status

(単位：mm)

接触防止対象動作	警報発報 (前方位置)	作業車停止 (前方位置)	最高速運転時の 惰行停止距離※	障害物検出時の 作動停止
桁外面作業車 走行台車 (本州側走行)	8,000	4,000	2,700	停止可能
桁外面作業車 走行台車 (四国側走行)	10,600	6,600	2,700	停止可能
桁外面作業車 側面フレーム (本州側走行)	8,400	5,600	2,700	停止可能
桁外面作業車 側面フレーム (四国側走行)	8,600	5,900	2,700	停止可能
桁外面作業車 伸縮足場 (昇降及び伸縮)	600	150	ごくわずか	停止可能
桁内面作業車 移設台車 (本州側及び四国側走行)	5,000	3,000	ごくわずか	停止可能

※作業車停止信号受信時には、惰性によるフリーラン停止を行う。

- ③ スプレーを用いてセンサ部へ疑似的に水滴を付着させた結果、検出感度に影響しないことを確認した。

7. 今後の課題

作業車の接触事故防止を目的とした安全性能の高度化は本四連絡橋全作業車に共通する課題である。他橋の作業車への展開にあたっては、1橋ごとに適用の要否、既設制御回路への取込方法及びセンサ・治具の設置方法などの検討が必要である。そのため、実施工に基づく試行を継続し、検出範囲の適正化や警報装置の識別性向上などのマンマシンインターフェースの改善を通じて装置の改良に取り組む予定である。

8. おわりに

今般、国の施策にAIやIoTを始めとするデジタル技術を活用した研究開発が促進され、インフラ分野にはロボットによる構造物点検やセンシング技術を活用した自動車の自動運転などの技術革新が期待されている。本取組では、センシング技術を活用した安全装置を導入することにより、ヒューマンエラーに起因する接触事故の大幅な低減が可能であることを確認し、さらなる安全性能の高度化に向けた展望を得ることができた。

今後も、保全作業の省力化、ICT及びAIによる作業車の自動制御・操作補助などの求められるニーズに対応した新しい技術開発を行い、安全性能の向上、保全作業の更なる効率化に取り組む所存である。

ワイヤーロープ潤滑油の自動塗布装置の考案

Invention of Automatic Lubricant Application Device for Wire Rope

吉岡 将庸

Masanobu Yoshioka

本四高速道路ブリッジエンジニア (株)
神戸支店 鳴門保全センター 機械課
(前) 岡山支店 坂出施設整備室 機械整備課

原口 大樹

Daiki Haraguchi

本四高速道路ブリッジエンジニア (株)
岡山支店 機械技術センター 機械整備課

松葉 真人

Masato Matsuba

本四高速道路ブリッジエンジニア (株)
岡山支店 機械技術センター 工務課長

概要

瀬戸大橋に設置している桁外面作業車は、定期点検時に伸縮足場昇降用ワイヤーロープの表面に減摩及び長寿命化などを目的として潤滑油を人力で塗布している。しかし、潤滑油の塗布作業は側面フレーム内の狭隘かつ高所で実施することから転落及びワイヤーロープ巻取ドラムへの巻き込まれなどが危惧される。これらの問題点を解決するため、既存のワイヤーロープ自動塗布装置を参考に自動で潤滑油の塗布を可能にしたオリジナル塗布機を考案し、安全・衛生の向上及び作業の簡素化と省工程化を図った。

本稿では、ワイヤーロープ潤滑油塗布作業の安全・衛生の向上などに向けた自動塗布装置考案の取組について報告するものである。

The maintenance vehicle for outside girder installed on the Seto Ohashi Bridge applies lubricant manually to the surface of the wire rope used for raising and lowering the telescopic scaffolding during regular inspections for the purpose of reducing friction and extending the service life. However, since the lubricant application work is performed in a narrow and high place inside the side frame, there is a risk of falling and getting caught in the wire rope winding drum. To solve these issues, we devised an original application device that enables automatic lubricant coating, based on existing automatic application device for wire rope, with the aim of improving safety and hygiene, simplifying work, and streamlining processes. This paper reports on efforts to develop an automatic application device aimed at improving safety and hygiene in the application of lubricants to wire ropes.

1. はじめに

瀬戸中央自動車道の長大橋梁には、橋桁の点検及び補修塗装などの保全作業（以下、「橋体保全作業」という。）を安全かつ効率的に実施するためにアルミニウム合金製の橋梁点検補修用作業車が設置されている。橋梁点検補修用作業車のうち桁外面作業車の伸縮足場や曲弦トラス用の下面作業台（以下、「伸縮足場など」という。）は、構成機器及び機構から Gondola 関係法令の適用を受けるため、法令に基づく性能検査に適合し、かつ、所定の能力を常に発揮し安全に使用できるように定期点検及び修繕などを実施している（写真-1、表-1）。

また、伸縮足場などの昇降用ワイヤーロープは性能検査の際に検査官から減摩及び長寿命化などを目的に潤滑油の塗布を推奨され、定期点検の際にワイヤーロープの表面に潤滑油を人力で塗布している。しかし、潤滑油の塗布作業は側面フレーム内の狭隘かつ高所で実施するこ

とから転落や巻取ドラムへの巻き込まれなどのリスクが残留するとともに、資材の場内小運搬が煩雑、長時間化及び不衛生などの苦渋作業に対する改善要望があった。

これら問題点の解決に向けオリジナル塗布機の試作及び実橋試験などに取り組み、人力施工に比べ安全・衛生の向上、作業の簡素化と省工程化が期待できる自動塗布装置を考案した。



写真-1 伸縮足場の構造（下津井瀬戸大橋）

Photo 1 Telescopic scaffold structure (Shimotsui Seto Bridge)

表一 伸縮足場等を有する桁外面作業車の台数

Table 1 Number of maintenance vehicles for outside girder with telescopic scaffolding, etc.

橋梁名	区分	桁外面作業車 ^{※1}	
下津井瀬戸大橋	吊橋	4	(8)
櫃石島高架橋トラス	トラス橋	1	(2)
櫃石島橋	斜張橋	3	(6)
岩黒島橋	斜張橋	3	(6)
与島橋 ^{※2}	トラス橋	2	(8)
北備讃瀬戸大橋	吊橋	4	(8)
南備讃瀬戸大橋	吊橋	4	(8)
番の州高架橋トラス ^{※2}	トラス橋	1	(4)
台数		22	(50)

※1 ()は伸縮足場の台数を示す。

※2 下面作業台もゴンドラ関係法令の適用を受ける。

2. 桁外面作業車の概要と定期点検

2.1 桁外面作業車の概要

瀬戸大橋の補剛トラス桁に設置されている桁外面作業車は、自動車や列車が走行する橋桁の下面と両側面を取り囲んで走行するU字形の作業車で、下面作業台、サドル、側面フレーム及び伸縮足場から構成される(図-1)。この桁外面作業車は、下面作業台が橋軸方向に、伸縮足場が上下方向と橋軸直角方向の3次元に動くことが可能で、橋体の主構、下横構及び主横トラス側部などの広範囲に近接できる。

また、伸縮足場などは長大橋点検員による点検及び塗装工や足場工による修繕並びに資機材の搬入出などに使用し、安全かつ効率的な橋体保全作業を実現している(写真-2)。

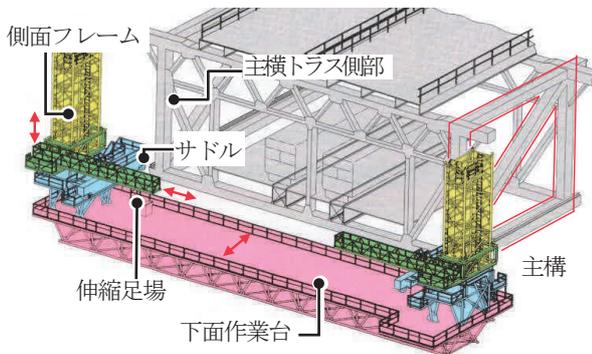


図-1 桁外面作業車の構成

Fig.1 Configuration of maintenance vehicles for outside girder



写真-2 伸縮足場を用いた近接点検の状況

Photo 2 Close-up inspection using the telescopic scaffolding

2.2 伸縮足場などの昇降機構と定期点検

伸縮足場は、各作業員が搭乗する伸縮足場、伸縮足場を側面フレームに沿って昇降させる昇降台車、昇降台車と巻上装置を連結するワイヤーロープ、ワイヤーロープを巻き取り送り出す巻上装置、積載荷重の測定及び警報を発報する安全装置などから構成される(写真-3)。この伸縮足場などは、構成機器及び機能からゴンドラ関係法令が適用されており、ゴンドラ安全規則第24条で規定されている性能検査を1回/年の頻度で受検する必要がある。この伸縮足場などは、構成機器及び機能からゴンドラ関係法令が適用されており、ゴンドラ安全規則第24条で規定されている性能検査を1回/年の頻度で受検する必要がある。この伸縮足場などは、構成機器及び機能からゴンドラ関係法令が適用されており、ゴンドラ安全規則第24条で規定されている性能検査を1回/年の頻度で受検する必要がある。

また、伸縮足場などの構成機器は、関係法令、性能検査時の検査官からの指導・助言及び故障事例の分析並びに評価結果などに基づき点検項目、内容及び頻度を決定し定期点検を実施している(表-2)。

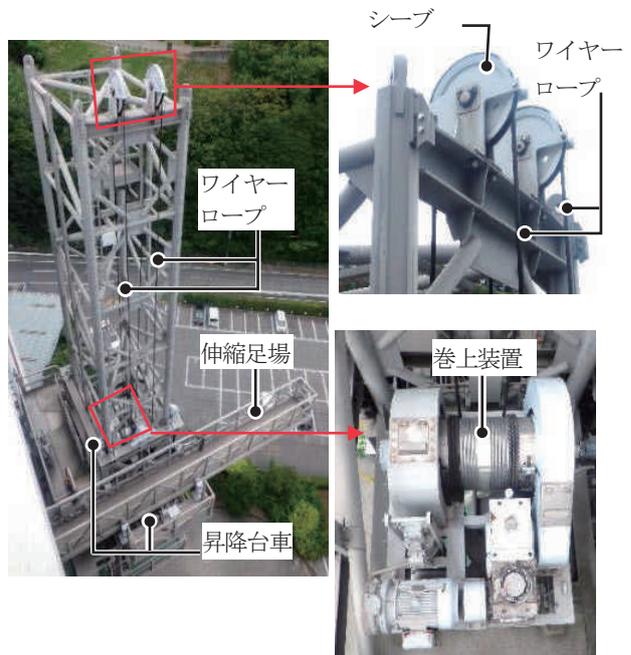


写真-3 伸縮足場の構成

Photo 3 Configuration of telescopic scaffolding

表-2 伸縮足場の点検項目頻度表

Table 2 Inspection item frequency table of telescopic scaffolding

単位装置	点検項目・内容	運転前	月	年	備考	
装置全体	運転状態	○	①	○	法令で規定	
	外観			○		
電動機	電流値、絶縁状態			○		
電磁ブレーキ	異常音、発熱、ボルトの緩み、軸受の給脂			○		
軸継手	嵌合のガタ、亀裂、芯振れ、給油			○		
減速機	異常音、発熱、給油			⑥	○	
ウインチ	親歯車	摩耗、片当り、亀裂、給油の状態		⑥	○	
	ドラム部	禁止金具の緩み、ボルトの緩み ドラムの損傷	○	①	○	法令で規定
ワイヤーロープ	素線切れ、キンク、錆、直径が公称径の7%以上減少、ロープ端金具の損傷、変形、亀裂		○	①	○	法令で規定
シープ	回転状態		○	①	○	法令で規定
	表面傷、摩耗、軸受の摩耗			③	○	
過速度検出器	作動状況(指示値、零点)、外観			○		
過荷重計	作動状況(指示値、零点)、外観			○		
ストッパー	亀裂、曲げ、緩み	○	①	○	法令で規定	

3. 人力塗布作業の課題

3.1 塗布方法の選定

一般にクレーンなどのワイヤーロープに潤滑油を塗布する方法として、スプレー散布、刷毛塗り、手塗りなどがある。伸縮足場など昇降用ワイヤーロープへの塗布方法は、潤滑油を芯材まで馴染ませ、環境の汚染防止及び施工能率の確保などから手塗りを基本とした人力塗布を採用してきた。各塗布方法の評価は以下のとおりである。

(1) スプレー散布 (ミスト状)

高い潤滑性と耐摩耗性を有し、摩擦の激しい箇所や高温・高荷重の環境下で使用されるモリブデングリースが充てんされた潤滑スプレーを用いて試行塗布した。潤滑剤はミスト状に放出され大半が周辺の大気に拡散し、環境への悪影響及び耐水性の不足が危惧されたため不採用とした(写真-4 a)。

(2) スプレー散布 (ストレート状)

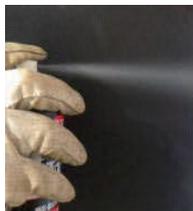
歯車が外気に曝されている開放歯車に使用しているオープンギヤグリスが充てんされた潤滑スプレーを用いて試行散布した。潤滑剤はストレート状に放出されワイヤーロープ表面に塗布されたが、下方への垂れ及び散布後の塗り広げが必要であった。垂れ防止は作業員の経験や技量などの個人差が大きく、環境への悪影響が危惧されたため不採用とした(写真-4 b)。

(3) 刷毛塗り

刷毛による塗布作業は、ワイヤーロープ径が約φ24と細く、螺旋状に巻かれたストランド表面への塗布作業の施工能率が悪いため、芯材への潤滑剤の馴染み不足が危惧されたため不採用とした(写真-4 c)。

(4) 手塗り

モリブデングリースを手塗りで試行塗布した。その結果、他の塗布作業に比べ均一に塗布できグリースの浸透性能から芯材に潤滑剤を馴染ませることが可能である。塗布した際、飛散しないため環境への影響も問題なく、施工性も良好であることから手塗りを基本とした人力塗布を採用してきた(写真-4 d)。



a) ミスト状



b) ストレート



c) 刷毛塗り



d) 手塗り

写真-4 塗布方法

Photo 4 Application method

3.2 塗布作業の効率化

年点検で実施している人力塗布作業の施工工数を調査した(表-3)。その結果、伸縮足場1台当たりの実塗布時間は約60分で、準備、片付け、場内移動などを含めた塗布時間は桁外面作業車1台当たり約180分であった。1日2台が限界であり、下面作業台にゴンドラ機能を有する曲弦トラス用桁外面作業車なども含めると塗布時間は約80時間に上り、海峡部の稼働率を考慮すると施工日数は約17日であった。また、人力塗布作業は伸縮足場などを昇降させる運転手、潤滑油を塗布する塗布作業員及び指揮者の3人1組で施工しており約51人工を要する。

本作業は高所・狭隘部と作業条件が悪く、寒風酷暑に曝されながら作業が長時間に渡るなどの苦渋作業が伴うため、塗布作業の効率化が望まれてきた。

表-3 人力塗布作業の施工工数

Table 3 Man-hours required for manual

項目	所要時間	作業時間
実塗布	東側の伸縮足場 60分	180分/台
時間	西側の伸縮足場 60分	
準備・片付け・場内移動	60分	80時間
桁外面作業車22台当たり		
施工日数		17日
施工工数		51人工/年



写真-5 人力塗布作業

Photo 5 Manual application

3.3 残留リスクの低減

人力塗布作業の施工にあたっては、危険予知活動及びツール・ボックス・ミーティングの安全活動において、表-4に示す主な危険有害要因と対策を行ってきた。

表-4 危険有害要因と対策

Table 4 Hazardous factors and countermeasures

危険有害要因	安全対策
・巻上装置の巻取ドラムへ巻き込まれる。(写真-5)	・運転者及び塗布作業員は、無線機(インカム型)で確実な意思疎通を確保する。 ・昇降操作中、塗布作業員は安全な場所に一時退避する。 ・指揮者及び運転者は塗布作業中、非常停止ボタンを押下げる。
・巻上装置周囲を移動中、海上に転落する。	・塗布作業員は、墜落制止用器具を装着する。 ・ランヤード(ショックアブソーバー付)を2本装着し、移動時は常にどちらかのフックを側面フレームの構成部材等に掛ける。
・塗布作業中、グリースが作業服及び保護具に付着し不衛生である。	・塗布作業員は、ヤッケ(上下)、耐油性手袋、保護メガネを装着する。
・塗布作業中、熱中症を発症する。	・報告体制を構築するとともに実施手順書を作成し、危険予知活動の際に周知徹底する。

しかし、本作業のリスクアセスメントの評価点は、リスク低減前で最大9点(平均5点)、上記の安全対策を実施しリスクを低減した後で最大6点(平均1.7点)とし、作業可能な水準(2点以下)としているが、作業上の注意点として落下、挟まれ、不衛生、熱中症などの残留リスクがあることから安全上・衛生上の改善が求められた。

4. オリジナル塗布機の考案

4.1 既存技術による自動化の検証

人力塗布作業の課題を解決するため既存技術を調査した。調査の結果、国内外で水門などの開閉用ワイヤーロープへの給脂を自動化しているシステム（以下、「既存塗布装置」という。）を確認した。既存塗布装置を借用した試行検討並びに桁外面作業車専用装置への改良を見据え、国内で使用実績のある既存塗布装置を用いて自動化を検証することとした。水門と桁外面作業車の伸縮足場などでは、現場条件及びワイヤーロープの仕様などに差異は見られるが自動化への有効性検証は可能と判断し、北備讃瀬戸大橋桁外面作業車2号機の西側伸縮足場昇降用ワイヤーロープに既存塗布装置を取り付けて試験施工を実施した。

既存塗布装置は図-2に示すようにワイヤーロープに潤滑油を塗布する塗布機、潤滑油を溜めるペール缶、ペール缶から塗布機に潤滑油を圧送するエアプレッシャーポンプ（以下、「ポンプ」という。）、ポンプに空気圧を供給するコンプレッサー、給脂・エアホース及び電線類などから構成される。試験施工は、伸縮足場の昇降速度に合わせてポンプを稼働させ安全性、品質及び作業性などを検証した。また、試験施工には施設保全点検員のほか施設部門担当者なども参加し、様々な視点から意見を収集し自動化への有効性を検証した。

試験施工の結果、塗布作業者の不安定な作業姿勢が回避され安全性の向上が期待でき、潤滑油がワイヤーロープ表面に均一に塗布され品質が向上するなどのメリットが確認され、自動化への有効性が検証できた（写真-6）。しかし、自動化施工にはダウンサイジング及び取扱方法の簡素化による作業効率の改善などの新たな課題も発見されたことから、実用化に向けオリジナル塗布機を考案することとした。

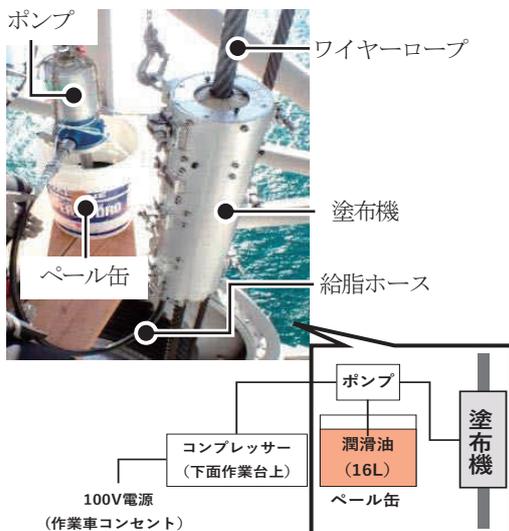


図-2 既存塗布装置の構成
Fig.2 Configuration of existing application device



写真-6 潤滑油塗布後の表面
Photo 6 Surface after application of lubricant

4.2 オリジナル塗布機の考案と試作

(1) ダウンサイジング

水門などの開閉用ワイヤーロープへ給脂するために製作された既存塗布装置は、適用ロープ径が太く構成機器も大型化しており、場内小運搬及び設置撤去が煩雑であった（図-3 a）。このため、オリジナル塗布機では対象ロープ径を桁外面作業車に限定し潤滑油の充てんエリアや余剰潤滑油の貯留エリアを減少させ体積を約76%縮小し、質量を約40kg軽量化した（図-3 b）、表-5）。

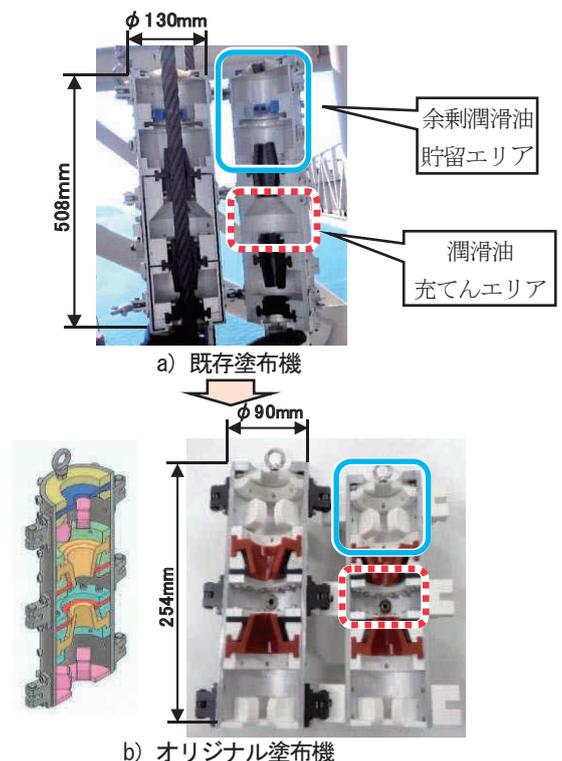


図-3 塗布機のダウンサイジング
Fig.3 Downsizing of application device

表-5 塗布装置の軽量化

既存塗布装置		オリジナル塗布装置		軽量化
構成機器	質量	構成機器	質量	
塗布機	20.0kg	塗布機	2.6kg	-17.4kg
ポンプ・ペール缶	10.0kg	充電式電動 グリスガン	12.0kg	-22.0kg
コンプレッサー	17.0kg			
給脂・エアホース	2.0kg			
電線類	5.0kg			
合計	54.0kg	合計	14.6kg	-39.4kg

(2) 異なるロープ径への対応

桁外面作業車の伸縮足場及び下面作業台の昇降用ワイヤーロープは、構造部材の自重、積載荷重及びガイドローラーの転がり抵抗などによりロープ径がφ22～φ35と異なる。このため、オリジナル塗布機のパッキン及び仕上げブラシなどの内装部品は円周方向に押出すことで交換できる構造とし、同一機で異なるロープ径に対応させ使用性の向上を図った（写真-7）。

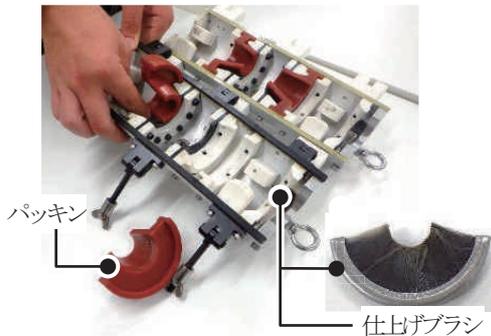
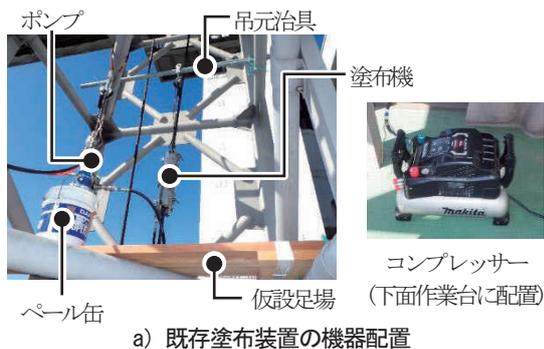


写真-7 オリジナル塗布機のパッキン交換

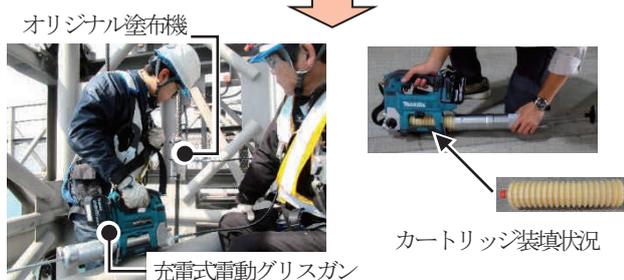
Photo 7 Replacing the original application device's packing

(3) 給脂方法の改良

既存塗布装置での給脂方法は、仮設足場、吊元治具、塗布機、ペール缶、ポンプ及びコンプレッサーの設置撤去並びに給脂・エアホース及び電線類の接続などが伴うため、人力施工に比べ作業効率の低下が危惧された（図-4 a））。このため、オリジナル塗布機では前述のダウンサイジングにより充てんエリアを減少したことで給脂方法を充電式電動グリスガンに、貯留方法をカートリッジ装填に改良し、準備、片付け、機器の着脱及び清掃作業などの簡素化及び省工程化を実現した（図-4 b））。



a) 既存塗布装置の機器配置



b) オリジナル塗布装置の機器配置

図-4 塗布装置の簡素化

Fig.4 Simplifying the application device

4.3 潤滑油の選定

自動化施工に最適な潤滑油を選定するため、既存塗布装置で使用実績のある「デンゾーペースト」、定期点検で人力塗布している「モリローブドレッサーNo.0」及び生物分解性を有した「バイオグリースLC-2」の3種類の潤滑油の特性を比較した（表-6）。潤滑油の特性比較の結果、以下のことから「バイオグリースLC-2」を選定した。

- 1) ちょう度はいずれもワイヤーロープや歯車類に使用できるグレードであり、充電式電動グリスガンで給脂できる。
- 2) 安全データシートの記載情報から生物分解性の効果により環境汚染のリスクが最も低い。
- 3) カートリッジタイプで購入可能でありペール缶からカートリッジへの詰替作業が不要となるため作業が衛生的かつ簡素化できる（写真-8）。
- 4) 桁外面作業車22台当たりカートリッジを約200本使用する見込みである。カートリッジ購入可能な供試体Aとコストを比較すると約10万円縮減でき経済的である。

表-6 潤滑油の特性比較

Table 6 Comparison of lubricant properties

供試体	A	B	C
名称 (メーカ)	デンゾーペースト (北日本防食機)	モリローブドレッサー (住鋳潤滑剤機)	バイオグリース (㈱ニッペコ)
使用実績	水門・堰	桁外面作業車、 クレーン等	水処理施設、 摺動機構等
色	茶褐色	灰黒色	黄褐色
ちょう度 (硬さ/粘さ)	310	380	280
環境性	△ (影響が危惧)	△ (影響が危惧)	◎ (環境負荷が低い)
カートリッジ 購入の可否	可 (特注対応)	不可 (詰替必要)	可
価格※1	約39万円 (約2,000円/本)	約25万円 (約1,300円/本)※2	約29万円 (約1,500円/本)
総合評価	○	×	◎

※1_カートリッジの容量は420ml/本。外面作業車22台で約200本使用する見込み。
※2_53,000円/16Lで換算。



写真-8 詰替作業 (供試体Bの場合)

Photo 8 Refilling work (In the case of specimen B)

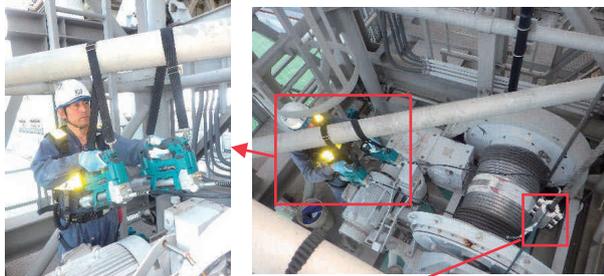
4.4 オリジナル塗布機による実橋試験

オリジナル塗布機に充電式電動グリスガンを接続した自動塗布装置を試験施工時と同箇所に取り付け実橋試験を実施した結果、以下の効果を得ることができた（写真-9）。

- 1) 不安定な作業姿勢が回避され、巻取ドラムへの巻

き込まれなどの事故リスクが低減され、安全性が向上した。

- 2) 構成機器のダウンサイジング及び給脂方法のカートリッジ化などにより取扱方法の簡素化及び衛生的な作業方法が確立できた。
- 3) 潤滑油を均一に塗布できた。



a) 安定な作業姿勢



b) オリジナル塗布機



c) 塗布状況

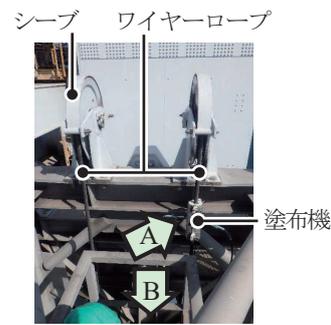
写真-9 実橋試験状況

Photo 9 Actual bridge test status

5. 実作業への展開とその成果

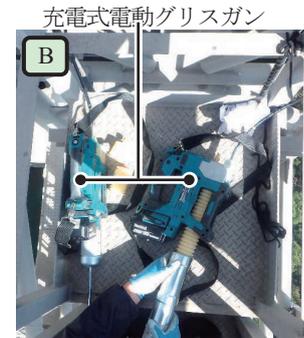
オリジナル塗布機を用いて施設保全点検員による潤滑油の自動塗布作業を実施した結果、以下の成果が確認されオリジナル塗布機による自動化施工は有効と評価できる。

- 1) 巻取ドラムから一定の距離が確保でき、巻き込まれなどの事故リスクが低減され、安全性が向上した。
- 2) シーブ近傍の狭隘な歩廊上でも安定した作業姿勢の確保及び容易なカートリッジ交換が可能であり、安全性が向上した (写真-10)。
- 3) 潤滑油はワイヤーロープ表面に均一に塗布でき、同等の品質を確保した。
- 4) 伸縮足場などの昇降速度 (5m/分) で塗布できるとともに、取扱方法の簡素化などにより人力施工に比べ約1.7倍の施工能率向上が期待できる。
- 5) 外面作業車全22台当たりの工数は、人力施工では51人工 (3人×17日)、オリジナル塗布機では36人工 (4人×9日) と試算され、約30%の省人化が期待できる (表-7)。
- 6) 危険予知活動のリスクアセスメントとして、評価点が最大2点 (平均1.2点) と低減でき作業自体の安全及び衛生面を向上させた。



a) 塗布機の設置状況

b) 塗布機の取付状況



c) カートリッジの交換状況

写真-10 シーブ近傍での自動給脂状況

Photo 10 Automatic lubrication near the sheave

表-7 自動塗布作業の施工工数

Table 7 Man-hours required of automatic application device

項目	所要時間	作業時間
実塗布 東側の伸縮足場	28分	107分/台
時間 西側の伸縮足場	28分	
準備・片付け・場内移動	51分	46時間
桁外面作業車22台当たり		
施工日数		9日
施工工数		36人工/年

6. おわりに

ワイヤーロープへの潤滑油の塗布作業は、潤滑油の性能を長持ちさせるため、手塗りを基本としてきた。しかし、転落、巻き込まれ、作業の長時間化及び不衛生などに対する改善要望があった。これらに対し、ダウンサイジング及び取扱方法を簡素化したオリジナル塗布機を考案し、安全・衛生面の改善及び作業の効率化を図ることが可能となった。

瀬戸中央自動車道の橋梁点検補修用作業車は、供用後36年以上が経過しているが、性能・機能の陳腐化、保守部品の枯渇などの課題を一つひとつ解決している。一方、技術の継承にも課題がある中、今回の取組では安全・衛生面の対策を実施し、苦渋作業の見直しを図りサステナビリティにも配慮した。今後も新しい技術を調査し、現行作業及び既設機器の改善・改良をとおして作業車の延命化、ライフサイクルコストの最適化、技術の継承などの様々な課題に取り組んでいく所存である。

保全業務高度化部会の取組

Report of subcommittee for maintenance

寺嶋 賢策 Kensaku Terajima

保全部
保全企画課長

1. 検討目的及び経緯

本四高速では、保全業務の高度化に向けた取組として、2009年(平成21年)から技術開発計画を策定し推進してきた。また、本四高速グループ一体で技術開発を効率的・効果的に推進するため、2013年(平成25年)に保全技術交流会に改組し、保全業務に関する課題を解決するための技術開発に取り組んできた。その後、2021年度(令和3年度)に最新技術によって高速道路事業の高度化・効率化を図ることを目的とした高速道路事業高度化本部が組織され、一構成組織である保全業務高度化部会として、活動を開始することとなった。



図-1 PDCA 高度化イメージ
Fig.1 PDCA upgrade image

同部会では、点検から補修に関するPDCAの一連(図-1)のプロセスの更なる高度化を目指すため、それまでの保全に関する検討内容を拡大し、ロボット開発、点検作業の高度化、システム開発及び補修機材・材料の高度化の4部門(図-2)を設け、種々の開発項目に取り組んでいる。ここでは、保全業務高度化部会の活動の概況を報告する。



図-2 保全業務高度化部会
Fig.2 Subcommittee for maintenance

2. 活動報告

2.1 ロボットWG

これまで人間が担っていた点検や補修などの作業をロボットに代替させ、プロセスを自動化することによって危険作業の低減、技術者不足への対応及び作業の効率化を目指したロボット開発などに取組んでいる。

インフラパトロール(首都高速技術)を活用した土木構造物点検の高度化・効率化に向けた検討として、試行及び検討を行ってきた。今後は、これまでに得られた成果から現場実装の可否を判断し、その結果に応じて、代替手法についても検討を進めることとしている。

トラス桁の点検や塗装のためのロボット開発として、自動画像取得に関する実橋試験や塗装ロボット試作機による室内試験まで到達した。今後、トラス桁の画像取得範囲の拡大・アセットマネジメントシステムとの連携や塗装ロボットの試作機製作と現地試験を経て、適用に向けた検討を行う計画である。

また、吊橋主ケーブルやハンガーロープの点検のためのロボット開発として、画像取得・変状判定の試験まで達成した。今後、実用機運用に向けた試験・検討を進める予定である。

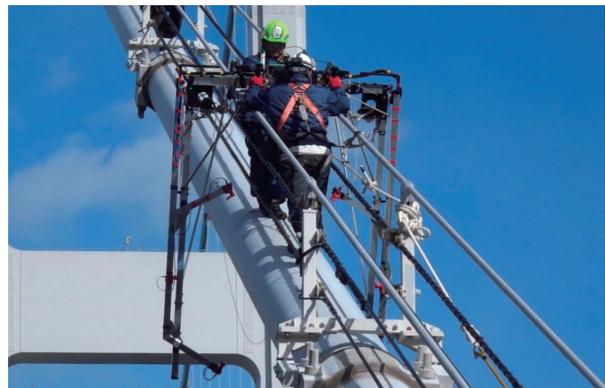


写真-1 点検ロボットによるケーブル点検状況
Photo 1 Cable inspection by inspection robot

2.2 点検高度化WG

点検技術の高度化として、遠隔・非接触による計測・診断技術の開発などに取組んでいる。

赤外線を活用したT-GAPによる鋼床版の疲労亀裂点検

作業の省力化・早期検出を目指し、伸縮ブームを搭載した試作機による点検を実施した。今後は、改善点を踏まえた試作機の改良を行う予定である。

新たな塗膜劣化の評価手法を確立するため、塗膜付着力が低下している暴露試験板を用いて劣化検出精度を検証した。今後は、塗膜点検・劣化評価への実装に向け、課題解決に向けた検討を進める。

長大橋点検の省力化・信頼性向上手法の検討について、現行の点検管理要領(長大橋梁)の個別長大橋版(案)の作成を目指す。

ハンガーロープ定着部の点検は、作業の大幅な省力化と張力開放に伴うハンガーロープの縮みやより戻りによる被覆塗膜の損傷防止を図るため、張力非開放でも測定可能な手法を開発し検証を行う。

鋼床版縦桁支承の新たな点検手法・更新方法として、支承の延命化・更新に係る施工検討や既設交換対象支承を観察中である。今後は、既設支承の疲労寿命評価及び支承機能の点検手法検討を進める。

トラス桁添接部内面の点検手法について、現状把握など情報収集を進め、今後の検討に活かすこととしている。



写真-2 遠隔操作の現場実証
Photo 2 Field demonstration of remote control

2.3 アセットマネジメントシステムWG

維持管理の高度化を進めるために、システムの高度化や開発に取り組んでいる。

次世代維持管理システムの構築として、長大橋3Dモデルを活用したタブレット点検支援ツール(BIX-eye)の技術検証などを実施した。今後は、代表橋梁での実装を経て各長大橋への展開を計画している。

土木構造物の点検システムの高度化として、点検システム(IRIS)とGIS座標情報の連携による変状報告の省力化を図れるようシステムを改修した。今後は、検証を行いフォローアップする予定である。

変状記録の入力支援や評価・診断精度を向上させるための画像解析及び診断AIの適用性検証を共同研究で実施している。今後も点検への実装を目指した研究開発を予定している。



図-3 AR技術による登録変状の表示
Fig.3 Visualization of recorded deformations utilizing AR technology

2.4 補修機材・材料WG

新規材料の開発、圧入試験後のハンガーロープ開放による確認など、トラス桁添接部内面腐食の点検・補修法開発などに取り組んでいる。

新規材料の開発として、超長期耐久性塗料の開発のための研究を継続中である。

圧入試験後のハンガーロープ開放による確認及び管理要領の更新として、室内試験を実施した。今後は、検証を計画している。

また、トラス桁添接部内面腐食の補修法の開発として、添接部内面の新たな防食方法の確立を目指すこととしている。

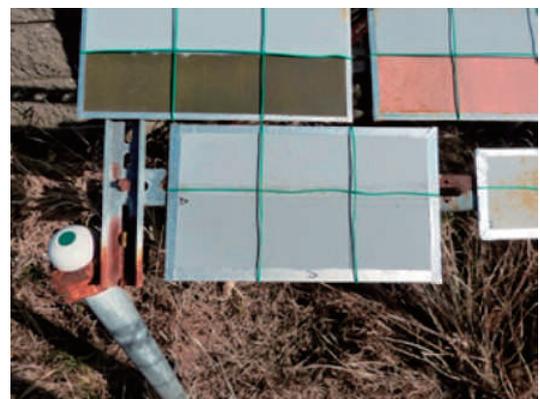


写真-3 防食塗装の暴露試験状況
Photo 3 Anticorrosion coating exposure test

3. おわりに

今年3月に策定した「JB本四高速グループビジョン2035」において、高速道路事業の高度化・効率化は2035年に向けた10年間の取組みの柱に位置付けられている。その中でも保全業務高度化部会の活動範囲は広く、前述のとおり様々な技術開発などを行っているところである。今後は開発した技術を順次現場に導入していく段階であり、グループ一体となって積極的に現場実装を図っていく。

防災・安全業務高度化部会の取組

Report of subcommittee for disaster prevention and safety

簗戸 喜一 Kiichi Sudo

安全防災・技術部
安全課長

松尾 俊宏 Toshihiro Matsuo

安全防災・技術部
防災課長

1. 取組項目

防災・安全業務高度化部会では、安全・安心で信頼できる本州四国連絡高速道路の提供を目的に、災害時の迅速な状況把握及び桁外面作業車などの支障物接触防止装置の開発に取り組んでいる。

本稿は、令和6年度に実施した防災・安全業務の取組のうち、主要な取組の概要を報告するものである。

2. ウェアラブルカメラによる迅速な状況把握

路面の降雪状況を遠隔かつリアルタイムで把握することを目的として、ウェアラブルカメラを全管理センターに導入し、迅速な情報収集体制を整備した。

令和6年度は大雪による通行止めは発生しなかったが、降雪や路面状況をパトロールカー搭載のウェアラブルカメラ映像でリアルタイムに確認でき、迅速な判断につながった。

今後は、現場状況の迅速な把握が求められる事故や災害対応などにおいても、ウェアラブルカメラの活用を図る。



写真-1 ウェアラブルカメラ (左) とイメージ画像 (右)

Photo1 Wearable camera (left) and Example image (right)

3. 桁外面作業車などの支障物接触防止装置の設置

本州四国連絡橋では、保全作業を安全かつ効率的に実施するため、桁作業車などが設置されている。しかし、進行方向の障害物確認不足などのヒューマンエラーに起因する接触事故が継続的に発生している。

このため、最新のセンシング技術を活用した接触防止装置（センサー）を開発し、実橋での動作確認において良好な結果が得られた。

令和6年度は、作業車の代表号機に対して、図-1に示す①走行動作、②足場の昇降・伸縮動作、③移設台車の

走行動作に対応する安全装置を設置し、実機による作業性及び安全性能などの確認を行った。今後は、他の桁作業車へ順次設置を予定している。

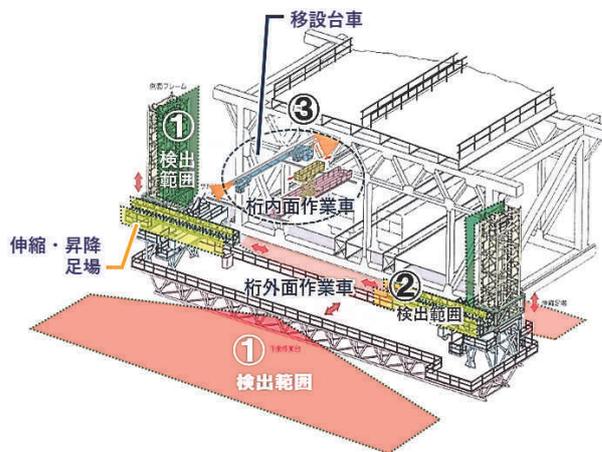


図-1 桁外面作業車の接触防止センサの設置案

Fig.1 Detection sensor plan of maintenance vehicle for outside girder

4. 新規項目

4.1 無人航空機（UAV）による初動点検の迅速化

大規模地震発生時の道路状況把握手段として、無人航空機（UAV）の活用を検討している。地上からの点検が困難な場合でも、UAVにより空中から迅速かつ確かな情報収集が期待できる。



図-2 マルチドローン飛行イメージ

Fig.2 Conceptual image of multi-drone flight

4.2 異常時点検ルート of 自動案内システムの導入

異常気象などによる道路状況の把握や異常時点検を、初期参集者でも確実に実施できるように、点検ルートを自動で案内するシステムの導入を図る。

交通運用高度化部会の取組

Report of subcommittee for traffic control

四木 誠二 Seiji Shigi

業務部
道路管理課長

1. 検討目的及び経緯

当社の交通運用において、事故や渋滞のない、安全・快適で使いやすい高速道路の実現を目的として、先進技術の導入や渋滞対策の高度化に向けた検討・調整を行っている。これらの取組をグループ全体で一体的に推進するため、2021年に高速道路事業高度化本部が発足し、その下にテーマごとに検討を行う部会が設置されている。交通運用高度化部会は、その一つとして設置されたものである。

本稿では、「交通管制の高度化」及び「道路情報提供の高度化」の2つのテーマについて、2024年度の取組内容を概説する。

2. 交通管制の高度化

交通管制の高度化に向けた取組として、路側カメラの増設による監視範囲の拡大及びAI画像認識技術を活用した画像解析の導入に向けた検討を進めた。

2.1 路側カメラの増設検討

路側カメラの増設に関しては、先に設置予定地(図-1)に関する調査を実施、工事発注に向けてカメラ配置の設計をはじめ、制御機器及び伝送機器の配置、各種機器の仕様、制御方式・伝送方式、ならびに伝送路の構成について検討を行い工事発注資料(案)を作成した。



図-1 交通流監視用カメラの設置概略図
(Fig.1 Schematic diagram for installation of traffic flow monitoring cameras)

2.2 AI画像処理装置の設置検討

AI画像認識技術を活用した画像による事象検知の導入に関しても、工事発注に向けて次の検討を実施した。増設する路側カメラの映像に加え、既設カメラの映像も検知対象とするシステム構成とし、検知した事象、場所及び画像を直ちに管制室に発報、本社及び各管理センターにおいても検知事象の画像を再生できるよう設計した。また、AIによる事象検知仕様を調査検討、路側カメラをAI検知用に監視制御する画像監視中央設備との整合を図るとともに既設・新設いずれの映像圧縮形式にも対応可能な処理容量を有すること、設置場所を片系構成とすることなど、設備仕様について検討を行い、工事発注資料(案)を作成した。

3. 道路情報提供の高度化

道路情報提供の高度化に向けた取組として、ETC2.0プローブデータを活用した精度の高い渋滞情報の提供の導入に向けた検討を進めた。検討結果などの詳細については、技術論文「ETC2.0を用いた渋滞情報提供の精度向上に関する取組」(P47~P52)を参照されたい。

3.1 ETC2.0プローブデータを活用した渋滞のAI解析

2022年度に設置したプローブ解析設備においては、路側アンテナの設置間隔が広いため、データ収集や時空間分析図への反映にタイムラグが生じ、渋滞情報の把握、提供が遅延するという課題があった。

この課題に対応するため、AIによる補正機能を実装、受信前のプローブデータを予測して、渋滞情報の把握、提供がリアルタイム化するように改修を行った。

4. まとめ

当部会は、2024年度に検討を実施した各種施策について導入に向けた取組を進めるとともに、導入済みシステムの検証を行い、本四道路における交通運用高度化を推進していく。これにより、事故・渋滞の低減を図り、安全・快適で使いやすい高速道路の提供を目指す。

ETC・サービス業務高度化部会の取組

Report of subcommittee for ETC and service

萬城 基樹 Banjo Motoki

企画部
経済調査課長

1. 検討目的及び経緯

本部会は、トラフィックカウンターやETC2.0などのデータの分析・活用を通じ、お客様のニーズを踏まえた快適で便利な高速道路サービスの提供、効果的な利用活性化策の策定につながる本四高速道路の利用実態把握方法の検討を目的としている。

2. 検討内容及び結果

ETC2.0プローブデータには、位置情報及び時間情報を含む経路データを有しており、道路の利用状況の把握が可能となっている。

その位置情報・時間情報を利用し、休憩施設別に平日と休日の立ち寄りを把握したものが図-1、室津PAの時間帯別滞在時間を把握したものが図-2である。

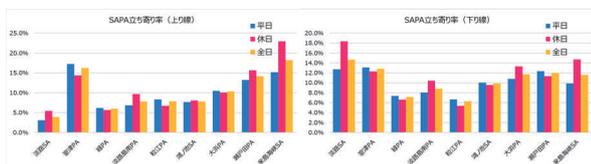


図-1 休憩施設別立ち寄り率
Fig.1 Drop-in rate by rest facility

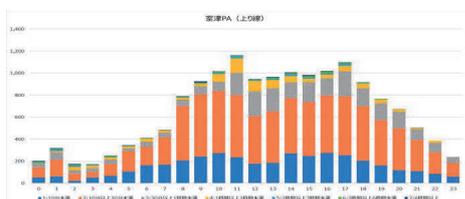


図-2 時間帯別滞在時間
Fig.2 Stay time by time zone

上記データに、発着地情報を加味することで、お客様の属性に合わせた品ぞろえの検討や情報発信など、ターゲットを絞った効果的な利用促進策への活用も期待される。

また、淡路北スマートICの利用実態の分析結果をもと

にして、効果的な誘導方法の検討を行い、当社HPに淡路北スマートICへの方面別の案内動画を掲出することで誘客を図った(図-3)。



図-3 淡路北スマートICへの案内動画
Fig.3 Awajikita Smart IC Guide Video

3. まとめ

お客様のニーズに応え、より効果的かつ効率的なサービスの提供に繋げていくためには、データの活用が重要であり、関係部署と連携しデータの分析を進めていく必要があると考える。

IRFグローバルロード会議

IRF Global Road Conference

2024年12月10日から13日にかけて、IRFグローバルロード会議が世界道路連盟 (International Road Federation : IRF)の主催により「道路の未来を切り開く」のテーマによりアメリカのオーランドで開催されました。

60以上セッションが行われ、環境に配慮したインフラや高度道路交通システム(Intelligent Transport Systems : ITS)などの新技術による持続可能な交通ネットワークのあり方が議論されました。

IRFは道路開発に関する公的機関と私的機関との交流を目的に1948年に設立されました。本四高速からは保全部電気通信課の堀川が「次世代低位置道路照明の開発と試験(Development and Testing of Next-generation Low-position Road Lighting)」と題して本四高速が管理する海峡部長大橋梁に設置する橋梁用広スパン低位置道路照明について論文発表を行いました。

司会者や聴講者からも、積極的に質問をいただき次世代道路照明のあり方について、意見を交わすとともに、素晴らしい道路照明であり、他の道路への採用も期待できるとのコメントをいただきました。

会議期間を通じて、AIを活用した道路の維持管理、EV用の充電舗装、非接触埋め込み充電に最適な舗装などの土木と電気の複合的な技術考察やCCAMと呼ばれる人と物の移動に関する包括的サービスを構築する試みなどの新たな取組に関する幅広い発表がありました。

会議と同時に展示会も催され、交通管理システムから建設資材までの幅広い分野のベンダーによる展示がありました。

展示会では、デモンストレーションなどを通じて、参加者は幅広い情報交換を行っていました。

2025年のIRFグローバルロード会議は、アメリカ(ロサンゼルス)で12月9日から12日にかけて開催される予定です。

(保全部 電気通信課 堀川俊)



写真-1 会場の様子

道路災害マネジメントに関する 国際ワークショップ(大阪)

International Workshop on Road Disaster Management (Osaka)

2025年5月27日、世界道路協会(World Road Association : PIARC)と日本道路協会(Japan Road Association)が共同で道路災害マネジメントに関する国際ワークショップを大阪で開催しました。

PIARCは、道路と道路交通分野における国際的協力の推進・発展を目的とした、道路交通分野で最も歴史のある非営利の国際機関であり、日本道路協会は、1954年にPIARC日本国内委員会として正式に認定されて以降、日本におけるPIARC活動の事務局機能を担っています。

本ワークショップでは、昨今、地球温暖化で激甚化、多発化する自然災害に対するマネジメント強化のため、日本の先駆的な災害マネジメント手法を発信するとともに、海外の新しい災害マネジメントの取組が“協調と協働”をキーワードで紹介されました。また、2024年の能登半島で起きた災害への対応を報告する特別セッションや、多様性配慮の視点から道路災害を考えるパネルセッションも開催されました。

本四高速からは長大橋技術部技術支援課の下瀬が「本四連絡橋における暴風時の事前通行止め及び早期通行止め開放に関する取組(Efforts to improve safety and efficiency of traffic closure procedures during strong winds in the Honshu-Shikoku Bridges)」について技術発表を行いました。その他、技術セッションでは、道路関係機関内の協調の視点から見た好事例として「路面凍結予測システム」、組織間の協働の視点から見た好事例として「将来インフラと気候における道路気象と災害マネジメントを前進させる学際的研究」について情報提供がなされ、道路管理者などが経験・研究により得た知識、考え方を共有しました。今回のPIARCにおける活動について、第17回冬期サービスとレジリエンスに関する世界大会がシャンベリー(フランス)で開催される予定です。

(長大橋技術部 技術支援課 下瀬恒大)



写真-1 本四高速の発表(下瀬)

PIARC TC4.2 橋梁委員会

PIARC TC4.2 Bridges

2025年6月23日～27日の日程で、オーストラリアのブリスベンで、世界道路協会（PIARC：Permanent International Association of Road Congress）のTC4.2橋梁委員会及び合わせて開催されたオーストラリア橋梁会議に参加しました。

TC4.2橋梁委員会は、前回2024年9月にインドのベンガルールで開催された第2回に続く第3回の委員会で、委員会には本四高速道路ブリッジエンジニア（株）の遠藤常務取締役と本州四国連絡高速道路（株）の坂本が委員として参画しています（TC4.2橋梁委員会については第143号を参照）。

第3回の委員会では、6月23日から2日間にかけて約80名（うち、対面26名）の委員が参加し、各WGの活動状況とスケジュール、並びに今後の委員会のスケジュールなどについて議論が行われるとともに、今回のホスト国であるオーストラリアでの道路橋の維持管理状況やベルギーでのPC橋のゲルバーヒンジ部における変状と対応などに関する技術プレゼンが行われました。

6月25日から3日間にかけて行われたオーストラリア橋梁会議は、クイーンズランド州政府の協力のもと、オーストラリアとニュージーランドの道路協会が主催した国際会議で、会議は6つの基調講演と5つのセッションにより行われました。基調講演ではオーストラリアでの道路橋の設計における活荷重の変遷、各国の落橋事例からの教訓、昨年アメリカで発生した船舶が衝突し落橋に至ったトラス橋に対する対応などについて紹介がありました。各セッションでは橋梁の設計、施工、維持管理のほか技術基準などに関する発表が行われ、オーストラリアでの過酷な活荷重状況下における道路橋のモニタリング、ニュージーランドでの耐震対策などについて紹介がありました。

また、会議ではPIARC及びTC4.2橋梁委員会の活動紹介やPIARCの各委員による技術プレゼンも行われ、日本からは遠藤常務が「本四連絡橋の維持管理に関する取組みと強風時の通行止めに関する取組み（Efforts Regarding Maintenance and Management of Honshu-Shikoku Bridges and Road Closures due to Strong Winds）」の題目で口頭発表したほか、合わせて行われた長大橋のアセットマネジメントに関するパネルディスカッションにも遠藤常務が参加しました。

このほか、会議に先立ちテクニカルビジットとして、ブリスベン市内の河川を跨ぐ橋梁も視察しました。

今後は、2025年10月に中国の南京、2026年3月にフランスのシャンベリーで開催される世界道路会議冬季大会と合わせて開催される予定です。

（長大橋技術部 技術総括課 坂本佳也）



写真-1 委員会の状況

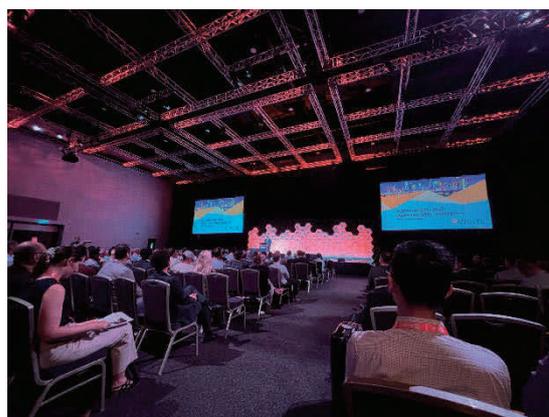


写真-2 橋梁会議の状況



写真-3 橋梁会議での発表状況



写真-4 テクニカルビジット（ストーリーブリッジ）

北欧の長大橋管理者との技術交流会

Technical Exchange with Long-span Bridge Operators in Northern Europe

北欧の長大橋管理者であるストアベルト社、オーレスン橋公社、スウェーデン道路庁、デンマーク道路庁と、2025年6月25日～7月2日の日程で、各個別に技術交流会を行いました。

ストアベルト社（A/S Storebælt）は、デンマークのフン島とシェラン島を結ぶ吊橋であるグレートベルト橋の管理者であり、2018年7月30日に本州四国連絡高速道路（株）（以下「本四高速」という。）と結んだ技術協力協定に基づき、技術交流会を実施しています。ストアベルト社からは、高架橋部の支承受替や、主ケーブルの立入り防止柵、ケーブル作業車の改良、ハンガーループ交換計画について話題提供がありました。また、2029年に完成予定のフェールマン・ベルトトンネルの交通管制機能を統合するにあたり、本四高速の交通管制の紹介を交えて、意見交換を行いました。

オーレスン橋公社（Øresundsbro Konsortiet）は、デンマークとスウェーデンを結ぶ斜張橋であるオーレスンリンクの管理者です。オーレスン橋公社からは、伸縮装置の取替や、トラス桁内の除湿、鋼製トラス桁の全面塗替塗装に関する話題提供がありました。また、オーレスン橋が開通25周年の節目を迎えることから、デンマーク及びスウェーデン両国の国王などが出席される記念式典が2025年7月1日に開催され、本四高速も招待されました。本四高速からは長大橋技術部の西谷シニアエキスパートが出席し、後藤社長からオーレスン橋公社 CEO への祝辞をお渡ししました。

スウェーデン道路庁（Swedish Road Directorate）とは、2024年に米国のウェストポイントで開催された国際吊橋構造橋梁管理者会議（ICSBOC2024）での交流をきっかけに、今回初めての技術交流会を行いました。スウェーデン道路庁は、7橋の吊橋構造橋梁を管理しており、今回の技術交流会では、ウッデバラ橋における斜ケーブル定着部の除湿や、エルスバーク橋における伸縮装置の補修などに関する話題提供がありました。本稿では、特に先進的な取組である、ウッデバラ橋における斜ケーブル定着部の除湿について紹介します。ウッデバラ橋は、2000年に供用開始された中央径間414mの斜張橋であり、開通以来、斜ケーブルの桁側の定着部において滞水が確認されており、ケーブルストランドの腐食が懸念されていました。滞水の原因は、結露及び部材隙間からの雨水の浸入であると推定されています。そこで、2箇所斜ケーブルの桁側の定着部を対象に、2023年5月より除湿システムの試験施工が実施されています（写真-1）。ケーブル保護管と定着部材の間にジャバラを設置することで、ケーブルの温度伸縮に対応した気密構造としています。

乾燥空気は、箱桁内に設置されたテント内へ貯めて、除湿対象箇所へ送気される構造となっています。除湿部の温湿度計測によるモニタリング評価では、試験施工当初はジャバラ部などでの気密性の問題で相対湿度が80%前後でしたが、数回の構造改良による気密性の向上などによって、相対湿度は20～60%となっている状況です。今後、相対湿度が目標値の40%を達成できる状況になれば、他の箇所への適用が検討されています。

デンマーク道路庁（Danish Road Directorate）との技術交流会では、建設中の斜張橋である新ストアストローム橋の現地視察を行いました。新ストアストローム橋は、シェラン島とファルスター島を結ぶ道路鉄道併用橋であり、1937年に供用開始した旧橋が老朽化したため、新たに斜張橋（橋長320m、最大支間長160m）を含む全長3832mの橋梁を建設中です。現場訪問では、橋面防水工や現場収束型の斜ケーブル定着部の施工を行っている様子を見学しました（写真-2）。

（長大橋技術部 技術支援課 小林弘昌）



写真-1 ウッデバラ橋 斜ケーブル定着部の除湿システム



写真-2 新ストアストローム橋 橋面防水工及び斜ケーブル定着部の施工の様子

第12回ニューヨーク市橋梁会議

12th NEW YORK CITY BRIDGE CONFERENCE

第12回ニューヨーク市橋梁会議（NYCBC）が、2025年8月25日から26日にかけてニューヨーク市の Hilton Midtown Hotel で開催されました。本会議は橋梁の建設及び維持管理に関する情報交換の場として2年ごとに開催されており、大学や道路管理者、建設コンサルタントなど、出席者は様々です。

今回は4編の基調講演と97編の論文発表が行われました。全18のセッションには、橋梁の耐震設計や耐震補強、橋梁のモニタリング、吊構造橋梁、橋梁の点検・維持管理・補修、橋梁のリスク軽減、橋梁の疲労と耐用年数評価、革新的な橋梁技術などがありました。本州四国連絡高速道路（株）（以下「本四高速」という。）からは、橋梁の疲労と耐用年数評価のセッションに、技術支援課の小林が「赤外線サーモグラフィカメラを用いた疲労亀裂検出技術のデンマークの橋梁への適用可能性検証（Applicability of Fatigue Crack Detection with Infrared Thermography Camera to Bridges in Denmark）」と題して、道路橋梁保全課の WANG が「鋼床版の疲労亀裂に対する TRS を用いた補修方法に関する研究（A study on Repair Method Using TRS for Fatigue Cracks in Orthotropic Steel Deck）」と題して、長大橋鋼床版の疲労損傷に対する遠距離の非破壊検査方法及び床版下面から実施可能な補修方法について論文発表しました。

国際会議終了後には、橋梁の維持管理に携わる方々のみでワークショップを開催しました。本四高速以外に、米国の長大橋管理者である Metropolitan Transportation Authority (MTA) 及び Port Authority of New York and New Jersey (PANYNJ) などが出席しました。吊構造橋梁の長寿命化及び大規模修繕など、橋梁管理者が現在頭を悩ませている問題を中心に議論が行われました。本四高速から、小林と WANG が上記2題の論文発表のトピック以外に、次世代の橋梁点検支援ツール（BIX-eye）及び橋梁用広スパン低位置道路照明技術についても紹介しました。その他、MTA から「MTA の吊橋を永遠に若々しく保つ（Keeping MTA's Suspension Bridges Forever Young）」、PANYNJ から「ジョージ・ワシントン橋補修工事 - 進捗状況報告（George Washington Bridge Restoration - Progress Update）」と題した話題提供をいただきました。

また、本会議に先立ち行われたテクニカルツアーではブルックリン橋をはじめとするマンハッタン島周辺の主要な橋梁を船上から視察しました。

（保全部 道路橋梁保全課 WANG HONGXIN）



写真-1 本四高速の発表（小林）



写真-2 本四高速の発表（WANG）



写真-3 ワークショップの様子



写真-4 テクニカルツアー（ブルックリン橋）

保有特許一覧

■国内特許

2025.10 時点

特許番号	特許名	特許権者
4115472	橋梁構造物における足場の組立方法	本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
4327834	斜張橋のケーブル定着部の防水処理方法およびその装置	本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
4627765	トンネル用換気ガス浄化装置のフィルタ再生方法及び装置	本州四国連絡高速道路(株)
5255516	ワイヤロープの防錆剤圧入方法及び装置	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 東京電設サービス(株)
5539793	打撃工具	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) (株)技術開発研究所
5582883	素地調整装置	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) (株)技術開発研究所
5757657	鋼管杭の防食施工方法	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 日鉄防食(株)
5873785	ボルト・ナットの素地調整工具	本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
5881984	素地調整工具	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) (株)技術開発研究所
5887249	土木構造物補修用ブラスト装置およびそれを用いた土木構造物補修方法	本州四国連絡高速道路(株)
5926078	素地調整装置	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) (株)技術開発研究所
6052737	鋼床版の亀裂検出方法および亀裂検出装置	本州四国連絡高速道路(株) 公立大学法人 滋賀県立大学 国立大学法人神戸大学
6341897	鋼床版の下面補修方法	本州四国連絡高速道路(株) 学校法人 関西大学
6478948	ワンサイドボルトで縦リブとデッキプレートとを接合した鋼床版構造を備える鋼橋	本州四国連絡高速道路(株) 坂野 昌弘
6671661	塗膜劣化検出方法	本州四国連絡高速道路(株) 国立大学法人神戸大学

特許番号	特許名	特許権者
6693997	主塔改修工事に用いる移動昇降式足場及び主塔改修工事における移動昇降式足場を用いた構造物の補修施工方法	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) エム・エムブリッジ(株) (株) I H I インフラシステム (株) タカミヤ
6691519	構造物の塗膜消耗量測定方法	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
6718910	ヘッド装置及びブラスト装置	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) エム・エムブリッジ(株) (株) I H I インフラシステム (株) ナカタ・マックコーポレーション
6718426	ケーブルの防食方法	本州四国連絡高速道路(株)
6885888	足場設置方法及び足場設置構造	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) エム・エムブリッジ(株) (株) I H I インフラシステム
6925876	網状物観測装置、及び画像編集装置	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 東京電設サービス(株)
6975212	鋼橋の鋼製閉断面部材の座屈防止構造	本州四国連絡高速道路(株)
7323380	網状構造体の維持管理方法及び網状構造体の維持管理装置	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 東京電設サービス(株)
7402903	ハンガーローブ防錆処理方法	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 東京電設サービス(株)
7503270	伸縮ブームの接触防止装置	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 岡田エンジニアリング(株)

■ 国際特許

2025.10 時点

特許番号	特許名	特許権者
US11346011B2 米国	METHOD FOR PREVENTING CORROSION OF CABLE	本州四国連絡高速道路(株)

文 献 紹 介

本州四国連絡橋関連技術文献紹介 (2024.09~2025.10)

題 名	著 者	雑誌名等	巻	号	年月	頁
本州四国連絡高速道路(株)	本州四国連絡高速道路(株) 保全部道路橋梁保全課 業 務部道路管理課	高速道路と自動車 第67巻 第11号		1	202411	3
本州四国連絡橋のアセットマネジメントと維持管理技術の開発	長友優征	建設マネジメント 技術		2	202412	6
世界最大級の明石海峡大橋プロジェクトー建設・維持管理への誇りと達成感ー	北川竜三	土木学会誌 Vol. 109 No. 12			202412	1
本四高速道路ブリッジエンジニア(株)	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 坂出点検管理室	高速道路と自動車 第68巻 第1号	68	1	202501	4
本州四国連絡高速道路(株)	本州四国連絡高速道路(株) 保全部保全企画課	高速道路と自動車 第68巻 第2号	68	2	202502	3
IoTを活用した吊橋センターステイロッドの遠隔監視手法の試行	栄翔太 横井芳輝 藤田憲二 河野晴彦 後藤稜平 溝上善 昭 石川敏之	インフラメンテナ ンス実践研究論文 集Vol. 4			202503	11
道路鉄道併用橋の技術ー世界初の建設技術と耐震技術ー	金田崇男	土木学会誌 Vol. 110 No. 3			202503	1
瀬戸大橋の塗替え塗装工事の現況	北村岳伸 波多野文人	Structure Painting 2025 Vol. 53			202509	5
近赤外線ハイパースペクトルイメージングシステムによる遠隔計測手法の検討	田村拓登 藤田憲二 河野晴 彦 塩澤大輝 阪上隆英 小 川裕樹 春名進佑 谷晃徳	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会			202509	3
桁外面作業車を利用した近赤外線計測による重防食塗装の劣化評価	谷晃徳 春名進佑 塩澤大輝 阪上隆英 小川裕樹 藤田憲 二 河野晴彦 田村拓登	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会			202509	3
橋軸方向変位が卓越する来島海峡大橋での地震対策	坂本佳也 花井拓	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会			202509	3
長大吊橋のハンガー破断時における隣接ハンガー等の張力変化に関する解析的検討	藤澤拓馬 野上邦栄 村越潤 岸祐介 坂本佳也 花井拓	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会			202509	3
腐食減肉の生じた吊橋ハンガーロープの引張試験結果に基づく構成則の検討	東條はづき 野上邦栄 村越 潤 岸祐介 坂本佳也 花井 拓	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会			202509	3
長大橋におけるBIMの属性情報とRAGを活用した変状報告書作成手法の検討	大木奎一 服部浩太郎 河野 晴彦 全邦釘	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会			202509	3

題 名	著 者	雑誌名等	巻 号	年月	頁
BIM/CIMとMRを活用した長大橋の維持管理システムの開発と運用にあたっての一考察	藤澤拓馬 野上邦栄 村越潤 岸祐介 坂本佳也 花井拓	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
長大橋の維持管理段階での活用を目的としたBIM/CIMの構築と構造化定義	東條はづき 野上邦栄 村越潤 岸祐介 坂本佳也 花井拓	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
長大橋BIMモデルとMR技術による自動重畳の高度化に関する検討	大木奎一 服部浩太郎 河野晴彦 全邦釘	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
交通荷重下における既設斜張橋ケーブルの応力実態の調査	小原礼 金田泰明 澤田守 竹口昌弘	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
長大橋における部材温度差の把握	小野一樹 溝上善昭 坂本佳也	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
本州四国連絡橋における縦桁支承の現状と今後の維持管理方針	平山晃司 小坂祐輔	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
鋼床版縦桁支承の機能低下が周辺部材に及ぼす影響に関する解析的検討	綾城威歩生 河野晴彦 栄翔太 熊井貴弘 横井芳輝 渡邊裕規	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
鋼床版縦桁支承の機能低下が周辺部材に及ぼす影響に関する実橋調査	栄翔太 河野晴彦 熊井貴弘 横井芳輝 渡邊裕規 綾城威歩生	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
全磁束法を用いた吊橋ハンガーロープの調査	上原勝幸 明石良男 椎木貞則 矢島卓	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
門崎高架橋作業車レールの影響度に関する風洞試験	小見山翔 花井拓	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
RC固定アーチ橋である立石川橋の耐震補強設計	西野豊 花井拓 坂本佳也	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	2
次世代低位置道路照明の開発	中村亮 西野晋二 堀川峻 田口廣幸 川上賢明 三橋直樹	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
吊橋ハンガーロープ素地調整へのレーザーシステム適用	西川一基 岸徳光 小室雅人 石川雅人 明石良男 武田浩	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3
ポリエチレン被覆ケーブル全長の状態把握	後藤稜平 溝上善昭 明石良男 小原誠 小坂祐輔 北村耕一	土木学会全国大会 第80回年次学術講演 会		202509	3

題 名	著 者	雑誌名等	卷 号	年月	頁
主ケーブル外装モニタリングシステムの開発(その2)	大淵慶大 永島源土 大井隆生 大浦義司 朝見之哉	土木学会全国大会 第80回年次学術講演会		202509	3
保全システムの連携による高度化	林宏樹	土木学会全国大会 第80回年次学術講演会		202509	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7年4月1日現在

委員長	竹口昌弘	幹事長	貴志友基
委員	金田崇男	幹事	光畑英樹
	小河正次		田中輝良
	萬城基樹		坂本佳也
	花井拓		河野晴彦
	貴志友基		大爺健司
	溝上善昭		小島仁俊
	村上博基		森野正祐也
	寺嶋賢策		青野智紀
	長尾幸雄		西井和哉
	香川晃		玉津祐一
	西野晋二		杉本勇人
	佐伯成巳		辻居浩之
	竇戸喜一		小西仁司
	松尾俊宏		二宮仁
	森山彰		

本四技報 第144号

発行 令和7年12月8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>



全紙/フルフ配合率70%再生紙を使用

