

本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.47 No.138 2022.6

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 138 号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.138

【巻頭言】

性能規定型の橋の点検と診断……………福永 勸… 1
Performance based inspection and diagnostics for bridges

【技術論文】

電気防食工法を適用した大鳴門橋 1 A 上屋道路桁
コンクリート床版裏面の補修と維持管理……………江口敬一・辻本 拓・長尾幸雄… 2
Repair and maintenance of the underside of concrete slab protected with cathodic protection
at the anchorage of the Ohnaruto Bridge

塗替塗装を実施した橋梁における塗膜の劣化予測……………大賀弘貴・山根 彰… 9
Deterioration prediction of coating films on repainted bridges

ETC データを用いたコロナ禍における本四高速道路の利用目的分析……………田中輝良・前島一陸…15
Analysis utilizing ETC data on the purpose for use of the Honshu Shikoku Bridge Expressways
during the COVID-19 pandemic

【技術開発年次報告】

本四高速グループの技術開発への取組……………福永 勸・西谷雅弘・遠山直樹…21
Efforts toward Technology Development

塗替塗装に関する検討……………山根 彰…22
Study on repainting on steel structure

ケーブル送気乾燥システムに関する検討……………平松直人・山根 彰…23
Study on cable dehumidification system

赤外線サーモグラフィの疲労点検・評価への適用……………杉山剛史・有馬敬育・平松直人…24
Study on the Advancement of Fatigue Inspection and Evaluation Using Infrared Thermography

耐震に関する取組……………西谷雅弘・金田崇男…26
Efforts toward seismic safety

【技術ニュース】

ゆめしま海道「岩城橋」が開通……………木村一也…30
Opening of Iwagi Bridge (Yumeshima Kaido)

【文献紹介】

本州四国連絡橋関連技術文献紹介……………31
Technical articles related to Honshu-Shikoku Bridges

電気防食工法を適用した大鳴門橋1A上屋道路桁 コンクリート床版裏面の補修と維持管理

Repair and maintenance of the underside of concrete slab protected with cathodic protection
at the anchorage of the Ohnaruto Bridge



写真-1 照合電極設置

Photo 1 Reference electrode installed



写真-2 モール陽極設置

Photo 2 Covered anode installed

電気防食工法を適用した大鳴門橋1A上屋道路桁 コンクリート床版裏面の補修と維持管理

Repair and maintenance of the underside of concrete slab protected with cathodic protection
at the anchorage of the Ohnaruto Bridge



写真-3 電流分配材設置

Photo 3 Distributor installed



写真-4 施工完了

Photo 4 Cathodic protection installation completed

性能規定型の橋の点検と診断

Performance based inspection and diagnostics for bridges

長大橋・技術部長 福永 勸

Susumu Fukunaga

2017年に道路橋示方書が改定され、2001年に部分的に導入された性能規定化が、さらに進化しました。これまでの構造材料の種類や寸法、解析手法等が指定された「仕様規定」から、構造物の目的とそれに適合する機能を明示し、機能を備えるために必要とされる性能を規定する「性能規定」に変わり、設計した橋の性能を評価することが可能となりました。

橋の性能のうち、構造安全性などの耐荷性能の照査法には、材料の弾性限界点（鋼材なら降伏点）または最大強度点に対して設定された一つの安全率で安全余裕を考慮する許容応力度設計法に替えて、限界状態と部分係数を用いた照査法が導入されました。作用の増加に応じて弾性挙動から非弾性挙動に変化し、さらに終局状態に至るまでの過程における代表的な状態変化点を「限界状態」とし、材料や部材の性能を評価する尺度として定義し、「部分係数」の導入により、作用と抵抗のそれぞれに対して、安全余裕を要因ごとに細分化して定量的に設定することとなりました。この結果、橋の性能評価をきめ細かく行うことが可能となりました。

橋の設計の性能規定化により、橋に求める性能が明確になると共に、その達成手段は限定されないため、達成手段の選択に自由度を与えることができ、新技術の採用の促進などが期待されます。また、橋に求める性能が明確になるため、対外的な説明が容易となり、道路の整備や管理に対する説明性が向上します。

一方で、橋の設計基準の性能規定化により新たな課題も生じることになります。

道路は、盛土、切土、トンネル、舗装や橋等の多種多様な構造物によって構成されており、電力・ガス・上下水道等のライフライン施設と同様に、線状につながることで初めて機能を発揮します。しかし、災害時には、ごく一部の構造物の被害によって道路全体が通行止めに陥ることもあります。本来、道路は、各種の作用（荷重、雨、地震、等）に対して弱部となる構造物を持つべきではなく、道路を構成する各構造物の性能を調和させる必要があります。このため、道路を構成する各構造物の性能を明確にするために、各構造物の設計基準の性能規定化の取組が始まっています。

また、道路の性能を確保するためには、新設時の各構造物の横断的な性能だけでなく、整備した時の基準が異なる既設構造物の性能とも調和を図らなければなりません。既設構造物の維持管理では、アセットマネジメントによるライフサイクルコストの最小化が求められます。

構造物のライフサイクルでは、点検で把握した各部材の状態を踏まえて構造物の性能を診断し、劣化予測により将来の性能低下を仮定し、適切な時期に補修を行うことで性能を回復させます。このため、新設、点検・診断、修繕、撤去・更新という道路構造物のライフサイクルの視点に立ち、時間軸上での性能を明確にするための技術基準の性能規定化が必要です。

2014年に法定化された道路橋の定期点検においては、2019年に定期点検要領が改定され、定期点検の品質の確保・向上を図りつつ、橋の状態把握のための作業を省力化できるように技術的助言が充実されました。これにより、点検方法については、健全性の診断の根拠となる橋の現在の状態を、近接目視により把握するか、または、自らの近接目視によるときと同等の健全性の診断を行うことができる情報が得られると判断した方法により把握することとなり、必ずしも全ての部材に近接しない方法でも状態の把握を行うことができるよう、点検方法の性能規定化が行われました。

橋の点検・診断を、性能規定化するためには、橋や橋を構成する各部材が担う役割や機能が、確保されているかどうかを診断することとなり、点検において診断するために十分な情報を取得しなければなりません。しかし、現在行われている点検では、橋や部材ごとに取得すべき情報の具体が定められていないこと、部材の役割や機能が確保されているかどうかの確認が困難な場合があること、近接目視による時と同等の健全性の診断を行える情報を取得する方法が明確となっていないこと等から、取得した情報にはばらつきが生じています。このため、点検で取得すべき情報や情報の取得方法を、各部材の役割や機能に基づいて定めることが必要です。

また、橋の性能の診断では、活荷重、風、地震等の種々の作用の状況に対して、橋や橋を構成する各部材がどのような状態（求めるべき限界状態を満足するかどうか）になるかを診断しなければなりません。このためには、橋の耐荷メカニズムを考慮した診断ロジックが必要となり、橋や橋を構成する各部材に適用された設計基準と設計内容の知識も必要です。

既設橋の性能評価は、道路の性能評価や既設橋自身のアセットマネジメントの基礎資料となるものです。このため、各部材ごとに点検で取得すべき情報や情報の取得方法を、その役割や機能に基づいて整備すると共に、橋の耐荷メカニズムを考慮した診断ロジックを構築して、性能規定型の点検・診断を実現することが必要です。

電気防食工法を適用した大鳴門橋1A上屋道路桁 コンクリート床版裏面の補修と維持管理

Repair and maintenance of the underside of concrete slab protected with cathodic protection at the anchorage of the Ohnaruto Bridge

江口 敬一 Keiichi Eguchi

鳴門管理センター
道路維持グループ兼橋梁維持グループ
エキスパート

辻本 拓 Taku Tsujimoto

坂出管理センター 橋梁維持グループ
前 鳴門管理センター 道路維持
グループ兼橋梁維持グループ

長尾 幸雄 Yukio Nagao

(株)ブリッジ・エンジニアリング
鳴門保全センター 副所長
前 鳴門管理センター橋梁維持課長

概要

大鳴門橋 1A 上屋道路桁は、1985 年に供用を開始し約 11 年が経過した頃から床版裏面の一部で、塩害によるコンクリートの浮きや鉄筋の腐食が顕在化したため、2001 年に断面修復工・表面被覆工を実施した。しかし、補修から約 10 年が経過した 2011 年頃からコンクリートの浮き・鉄筋腐食等の再劣化が確認され、現地調査の結果、その主な原因は、断面修復部と未補修部との境界部におけるマクロセル腐食であると推定した。本稿は、補修工法として再劣化の抑止、及びライフサイクルコストの観点で、電気防食工法のうちチタンリボンメッシュ陽極を用いた貼付型線状陽極工法を選定した経緯、及び同 1A 道路桁補修（電気防食）工事の施工と今後の維持管理について報告する。

Ohnaruto Bridge opened to traffic in 1985, and deteriorations due to chloride attack such as spalling of concrete and corrosion of reinforcing bar were observed in the underside of concrete slab at the anchorage of the bridge about 11 years after its completion. In 2001, partial replacement and surface coating were applied to the deteriorated parts of the concrete slab. However, the same deteriorations were observed again about 10 years after the repair work. The field investigation revealed that the main cause of the deteriorations was macro-cell corrosion at the boundary between the repaired and unrepaired sections. This report describes the process of selecting the attached linear anode method using a titanium ribbon mesh anode among the cathodic protection methods from the viewpoints of prevention of re-degradation and life cycle cost, and the repair work and future maintenance of the concrete slab at the anchorage of the bridge.

1. はじめに

大鳴門橋1A上屋道路桁(図-1, 図-2, 写真-1) (橋梁形式: RC2径間連続多室箱桁橋) (以下「道路桁」という。)は、塩害環境下に位置しており、床版裏面の一部でコンクリートの浮きや鉄筋腐食が顕在化してきたため、2001年に塩害対策として、断面修復工、表面被覆工、および剥落対策工が施工された¹⁾。当時施工された断面修復工は、コンクリートの劣化部分をはつり、鉄筋のさびを除去した後、防錆処理・プライマーを塗布し、ポリマーセメントモルタルによる断面修復を行っている。また、断面修復工の材料は、塩害対策として、鉄筋の防錆効果を高めるため亜硝酸リチウム水溶液を混入した断面修復材を使用した。しかし、補修から約10年が経過した2011年頃から、道路桁の断面修復工を施工した箇所に隣接する未補修の箇所で多数のコンクリートの浮き及び鉄筋腐食等の再劣化が確認された(写真-2)。

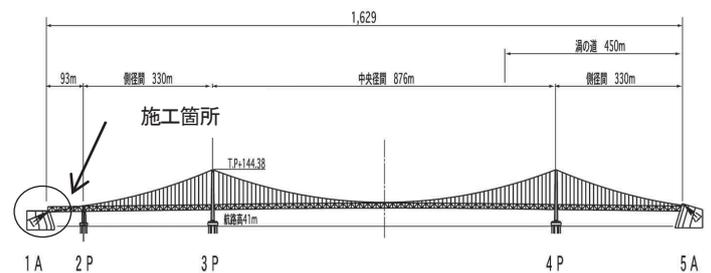


図-1, 写真-1 大鳴門橋1A上屋道路桁

Fig.1, Photo 1 Girder at an anchorage of Ohnaruto Bridge

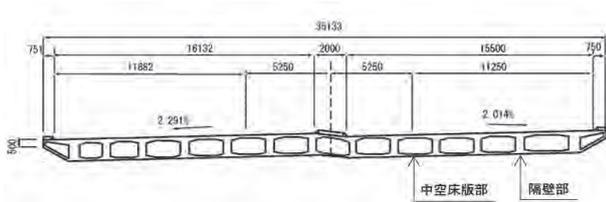


図-2 大鳴門橋1A上屋道路桁 (平面図)

Fig.2 Cross section of girder at an anchorage of Ohnaruto Bridge



写真-2 上屋道路桁の再劣化状況

Photo 2 Re-degradation situation of the underside of concrete slab

2. 現地調査と劣化原因の推定

2.1 調査内容

2011年頃にコンクリー床版裏面に顕在化した劣化状況の把握とその原因を特定するため、2016年に現地調査を実施した(表-1)。なお、調査は、2001年補修時に調査した同じ位置の5箇所(A~E、E:2001年補修時に経年劣化を把握するためモニタリング(自然電位))で実施した(図-3)。

表-1 コンクリートの調査内容

Table 1 Investigation contents of concrete

調査項目	調査方法	数量	摘要
(1)外観観察	目視調査等	5箇所	約8 m ² /箇所 (2×4m)
(2)塩化物含有量	JCI-SC5 (トリム法による粉末採取)	25 試料	5 試料 (2cm 毎)/箇所
(3)鉄筋かぶり	電磁波レーダ法	5箇所	約1 m ² /箇所
(4)(5)鋼材腐食	自然電位法	5箇所	約1 m ² /箇所
	はつり調査 (目視)	5箇所	20cm×20cm 程度
(6)中性化深さ	フェノールフタレイン法	5箇所	12点/箇所
(7)アルカリシリカ反応性	促進膨張量試験 (コア)	5 試料	1本/箇所 (コア法)

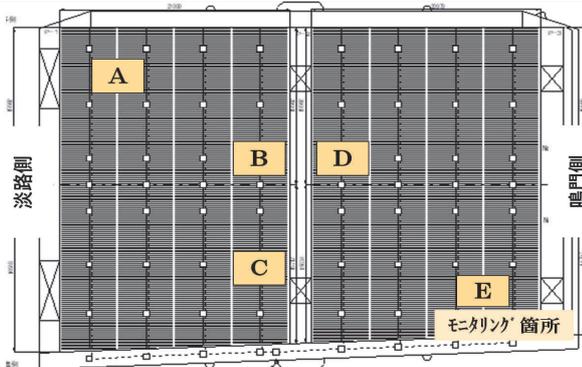


図-3 調査位置図 (道路桁裏面)

Fig.3 Investigation location (underside of deck slab)

(1) 外観観察

目視観察及び器具による調査で、ひび割れ、コンクリートの浮き、鉄筋露出等の位置と大きさを測定した。

(2) 塩化物含有量

コンクリート中の塩化物含有量により、既設構造物の劣化状況や原因を推定するため実施した。

(3) 鉄筋かぶり

鉄筋位置及びかぶり厚を測定するため、鉄筋探査器を用い、電磁波レーダ法により実施した。

(4) 鋼材腐食 (自然電位法)

健全部と見られる箇所の塗膜を撤去後、貼付型照合電極により自然電位を測定した。

(5) 鋼材腐食 (はつり調査)

(4)より得られた鉄筋位置データから、鉄筋径、かぶり厚、及び腐食状況を確認した。

(6) 中性化深さ

中性化による構造物の耐久性を確認するため、フェノールフタレイン法により測定した。

(7) アルカリシリカ反応性 (ASR)

ASRによる構造物の劣化予測を確認するため、促進膨張量試験により実施した。試験は開始から28日まで測定し、14日後の膨張量(%)で、ASRの可能性を判定した(表-2)。

表-2 促進膨張量試験の判定基準 (ASTM C 1260)

Table 2 Interpretation of expansion measurement test

膨張量 (%)	0.1 以下	無害
	0.1~0.2	有害と無害な骨材が含まれる (この場合、14日以降も更に試験を継続)
	0.2 以上	潜在的に有害

2.2 調査結果

(1) 外観調査

No.A, B, E(隔壁部)は、塗膜の浮き、かぶりコンクリートの剥落・鉄筋露出箇所が多数確認されたが、同 B, D(中空床版部)は、表面被覆工の塗膜の浮き、かぶりコンクリートの剥落・鉄筋露出が少数であった(表-3)。

表-3 外観観察結果

Table 3 Visual observation result

No.	塗膜の浮き・面積		剥落・鉄筋露出		備考
	箇所	m ²	箇所	m ²	
A	1	0.040	7	0.460	隔壁部
B	0	0	3	0.050	中空床版部
C	5	0.260	8	0.510	隔壁部
D	0	0	0	0	中空床版部
E	1	0.003	11	0.270	隔壁部

(2) 塩化物含有量

調査箇所5箇所のうち、4箇所の鉄筋位置において、塩化物イオン濃度は、腐食発生限界イオン濃度(1.2kg/m³)を超過し、塩害が懸念される環境下であることが判明した(図-4)。

なお、同イオン濃度 Clm1.2, Clm2.5 は、それぞれ非破壊検査マニュアル (H15.8 本四公団)、Clm1.73 は、コンクリート標準示方書²⁾に基づき算定した。

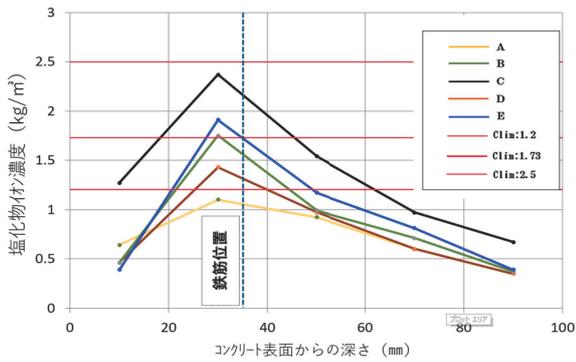


図-4 塩化物含有量分布向

Fig.4 The distribution of the chloride content

(3) 鉄筋かぶり (電磁波レーダ法)

隔壁部の主鉄筋, 配力鉄筋のかぶりが浅く, 設計値を満たさない箇所が確認された (表-4) .

表-4 鉄筋かぶり調査結果

Table 4 Covering depth survey result

No	測定方向		主鉄筋 (D32)			配力鉄筋 (D19)			備考
			設計かぶり: 54mm			設計かぶり: 35mm			
			最大	最小	平均	最大	最小	平均	
A	鳴門 (主)	瀬戸内 (配)	77	65	71	42	32	37	隔壁部
	淡路 (主)	太平洋 (配)	99	69	83	46	35	39	
B	鳴門 (主)	瀬戸内 (配)	67	51	58	51	38	45	中空床版部
	淡路 (主)	太平洋 (配)	78	53	63	56	38	50	
C	鳴門 (主)	瀬戸内 (配)	60	38	49	62	53	56	隔壁部
	淡路 (主)	太平洋 (配)	52	36	42	43	29	40	
D	鳴門 (主)	瀬戸内 (配)	85	67	73	54	50	51	中空床版部
	淡路 (主)	太平洋 (配)	89	67	73	50	46	49	
E	鳴門 (主)	瀬戸内 (配)	76	53	62	45	38	40	隔壁部
	淡路 (主)	太平洋 (配)	73	55	60	45	41	42	

(4) 鋼材腐食 (はつり)

実測のかぶりは隔壁部が浅く, 配力鉄筋は部分的に設計かぶり 35mm よりも少ない箇所が確認された。また, No.C は, 補修箇所で配力強筋が露出し, 鉄筋の断面減少が見られた (表-5, 写真-3, 表-6) . これらより, 中空床版部と比較し, かぶりの浅い隔壁部がコンクリートの剥落, 鉄筋の露出等の変状が多数確認された。

表-5 鋼材腐食調査結果

Table 5 Survey result of corrosion of reinforcing bar

No.	主鉄筋			配力鉄筋			備考
	鉄筋径	かぶり	損傷度	鉄筋径	かぶり	損傷度	
A	30.3	65	III	18.1	35	III	隔壁部
B	30.0	65	III	18.0	47	III	中空床版部
C	30.0	60	III	18.0	24	III	隔壁部
				16.0	12	II	
D	32.7	67	III	18.4	50	III	中空床版部
E	31.00	62	III	19.0	45	III	隔壁部



写真-3 コンクリート内部の配筋状況

Photo 3 Reinforcing bars in concrete slab

表-6 目視調査の損傷度判定

Table 6 Damage level judgment

外観損傷度	想定される状況
I	コンクリートの断面欠損が認められ, 内部の鋼材の露出や破断が認められる場合
II	ひび割れ, 錆汁, 剥離, あるいは剥離が連続的に認められる場合
III	ひび割れ, 錆汁, 剥離, あるいは剥離が部分的に認められる場合
IV	ごく軽微なひび割れや錆汁が認められる場合
無	損傷が認められない場合

(5) 鋼材腐食 (自然電位法)

No.A~Dの測点で-150mV以上を示し, 鉄筋が腐食している可能性は低いと判断した (表-7, 表-8) .

表-7 自然電位測定結果 (単位: mV)

Table 7 Spontaneous potential measurement result

No.	最小値	最大値	平均値	損傷度	備考
A	-138	-70	-108	IV	
B	-111	-47	-80	IV	
C	-126	-57	-90	IV	
D	-106	-55	-88	IV	
E	-314	-55	-202	II	

表-8 自然電位法による腐食判定

Table 8 Corrosion judgment

損傷度	自然電位値 (mV : CSE)	腐食性
I	-350 \geq E	大
II	-250 \geq E > -350	やや大
III	-150 \geq E > -250	軽微
IV	E > -150	なし

No.E の照合電極の経年変化を示す (表-9, 図-5) . 電極は, a~d の 4 箇所設置し, a (未補修部), b (断面修復箇所の境界部近傍の未補修部), c 及び d は断面修復箇所, d は未補修部 a から最も離れている。

2001 年の補修後に実施した鉄筋腐食判定は, ab の自然電位は判定 III の軽微な損傷で, 断面修復を行った c,d の自然電位は-250mV よりも下回り, 損傷度は II であった。その後, 2012 年に実施した同判定は, ab の自然電位は判定 III の軽微な損傷であった。一方, 断面修復を行った c,d の自然電位は-150mV より大きく, 補修は有効であった。

2016 年の調査では, b の自然電位が-250mV を下回る-314mV (損傷度 II) であった。一方, d は-55mV (損傷度 IV) であった。これは, 亜硫酸リチウム水溶液と混入し, 防錆を高めた断面修復箇所と未補修部の電位差が生じていることがわかる。

以上より, 再劣化が発生した原因は, 断面修復箇所と未補修部の電位差によるマクロセル腐食の可能性が高いと判断した (図-6) .

表-9 自然電位測定結果 (No. E)

Table 9 Spontaneous-potential result of measurement (No.E)

調査履歴	照合電極No. (単位: mV)			
	a	b	c	d
(1)2001.12 (補修後)	-236 III	-245 III	-340 II	-314 II
(2)2012.3 (2回目)	-180 III	-189 III	-124 IV	-72 IV
(3)2016.2 (3回目)	-217 III	-314 II	-222 III	-55 IV
備考	上値は自然電位, 下値は自然電位法による鉄筋腐食判定 (表-8 参照) を示す.			

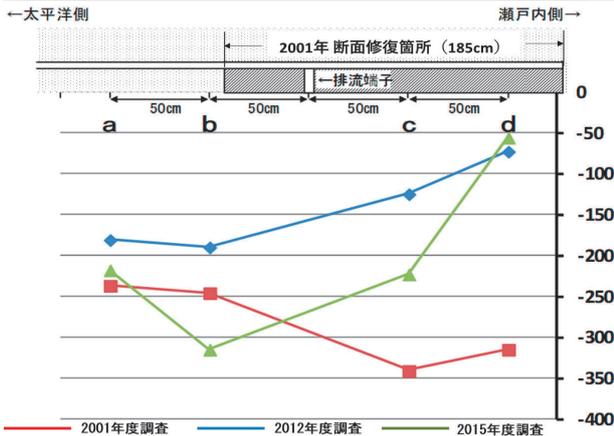


図-5 モニタリング位置の自然電位経年変化

Fig.5 Spontaneous potential change over time

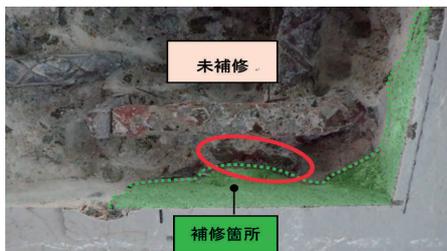
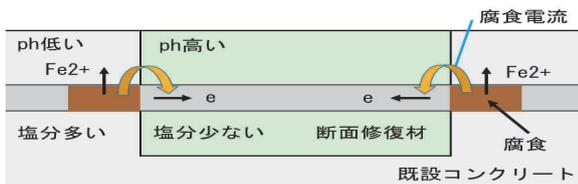


図-6 マクロセル腐食の劣化メカニズム

Fig.6 Degradation mechanism of macrocell corrosion

(6) 中性化深さ

いずれの調査位置も中性化の進行は遅く, 中性化による鉄筋の腐食の可能性は少ないと判断された。また, 2001年の調査時点の総平均値 8.4mm と+同値を示し, 表面被覆工による中性化の抑制効果が見られた (表-10)。

表-10 中性化深さ調査結果 (単位: mm)

Table 10 Neutralization depth testing result

No	最大	最小	平均
A	13	4	8.3
B	13	5	8.8
C	16	0	9.1
D	13	5	8.8
E	17	8	12.0

(7) アルカリシリカ反応

残存膨張量は, 試験開始後 14 日間における膨張量 (%) により無害 (0.1%以下) と評価された (図-7)。

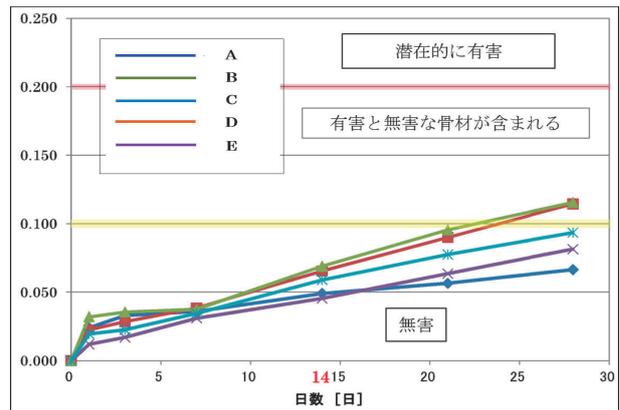


図-7 アルカリ反応結果

Fig.7 Alkaline silica reaction test result

3. 補修工法の検討及び補修設計

3.1 補修工法の検討

マクロセル腐食による再劣化を受け, 道路桁の塩害対策に最適な工法の比較検討を行った結果, 電気防食工法が下記理由により, 最適であると判断した (表-11)。

- 1) コンクリート中の内在塩分が高かった。
- 2) 表面被覆工及び断面修復工法の再施工はマクロセル腐食による再劣化が懸念された。
- 3) 電気防食工法は, コンクリート中の塩化物イオンを完全に除去できないが, 鋼材に適切な防食電流を供給することで, 鉄筋の腐食を抑制できるため, 適用可能と判断した。また, LCCの点で有利であった。
- 4) 脱塩工法はコンクリート中の塩化物イオンを鉄筋位置 (35mm) までしか除去できず, 深い位置の塩化物イオンを除去できない。

表-11 塩害対策の検討結果

Table 11 Study result of salt damage countermeasure

工法	検討結果	LCC ※
電気防食工法 (+断面修復工法)	・コンクリート中の塩化物イオン量に影響されない	1.0
断面修復工 (+表面被覆工法)	・コンクリート中の塩化物イオンをすべて除去できない ・マクロセル腐食による再劣化の恐れがある	1.1
脱塩工法	・コンクリート中の塩化物イオンをすべて除去できない ・鉄筋位置以深の塩化物イオンの除去効果が不明である	1.5

※) 供用後 200 年時点における初期費用+更新費+維持管理費を比率算定

3.2 電気防食工法の選定

電気防食工法には, 大きく分けて 2 つの電源方式がある。一つは, コンクリート内部の鋼材よりもイオン化傾向の高い金属 (亜鉛等) を陽極材とし, 鋼材との電位差

を利用した防食電流を供給する流電陽極方式がある。同方式は、外部からの電源装置は不要だが、陽極材の耐用年数は約 15 年と短く陽極材の交換も増え経済的でない。

もう一つは、直流電源装置のプラス端子に陽極材を、マイナス端子に防食対象の鋼材を接続し、防食電流を供給する外部電源方式がある。今回、大鳴門橋 1A 内に直流電源装置が設置可能で、防食電流が安定して供給でき効果的と考えた。また、陽極寿命が 40 年と長く、外部電源方式を採用した。次に、陽極形状の選定を行った。

陽極の形状は次の 3 種類の形状に分類される (図-8)。

- 1) 面状陽極：防食効果に最も優れるが、塗膜を全て撤去する必要があるが、経済的ではない。
- 2) 線状陽極：鉄筋量及び鉄筋の位置を考慮した、陽極量の設定を可能とし、部分的な塗膜の除去でよいため経済的である。
- 3) 点状陽極：防食が必要な箇所に部分的に適用するため、全体的にコンクリート浮き等の変状が発生している補修には適さない。

よって、陽極の材質には施工性が高く、経済的かつ、軽量で強度に優れたチタンリボンメッシュを使用した線状陽極工法を採用した。

電源方式	イメージ	特徴
流電陽極方式		<ul style="list-style-type: none"> 電源装置：不要だが防食電流の調整は不可 陽極寿命：約 15 年でシステムの更新が必要 本四事例：亀浦高架橋 5P
外部電源方式		<ul style="list-style-type: none"> 電源装置：大鳴門橋 1A 電気室 陽極寿命：約 40 年でシステムの更新が必要

陽極形状	イメージ	特徴
面状陽極		<ul style="list-style-type: none"> 防食効果に最も優れる 既存塗膜の全撤去が必要
線状陽極		<ul style="list-style-type: none"> 鉄筋量、位置に合わせ陽極量の設定が可能 既存塗膜の撤去は部分的でよい
点状陽極		<ul style="list-style-type: none"> 部分的な防食を行う場合に効果的

図-8 電源方式及び陽極形状の選定
Fig.8 Power supply system and selection of anode shape

4. 電気防食工法の施工

4.1 概要

道路桁床版裏面の電気防食工の防食面積は約 1,300 m² で、4 つの独立した回路から構成される (図-9)。各回路は外部電源装置から各回路専用の配線 (通電・排流) で接続された 4 回路のうち 1 回路が機能しなくなっ

た場合でも、4 回路全ての電気防食機能が喪失しないよう設計され、防食面積は電気防食工が十分機能する 500 m²/回路以下³⁾としている。

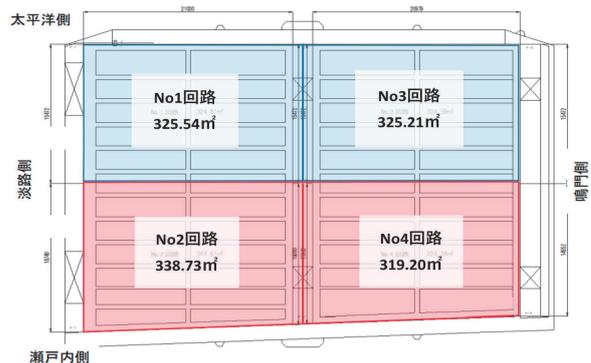


図-9 電気防食工の概要図

Fig.9 Arrangement of cathodic protection circuit

4.2 工法の詳細

電気防食工は、チタンリボンメッシュ陽極、電流を各陽極に分配するためのディストリビューター、陽極に防食電流を流す直流電源装置、及び電気防食の作動状態を確認するモニタリング用照合電極で構成される (図-10)。

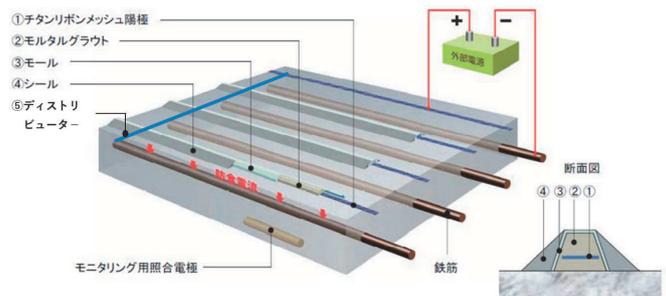


図-10 電気防食工法概念図

Fig.10 Schematic diagram of cathodic protection method

4.3 施工フローチャート

施工方法を、以下に示す (図-11)。

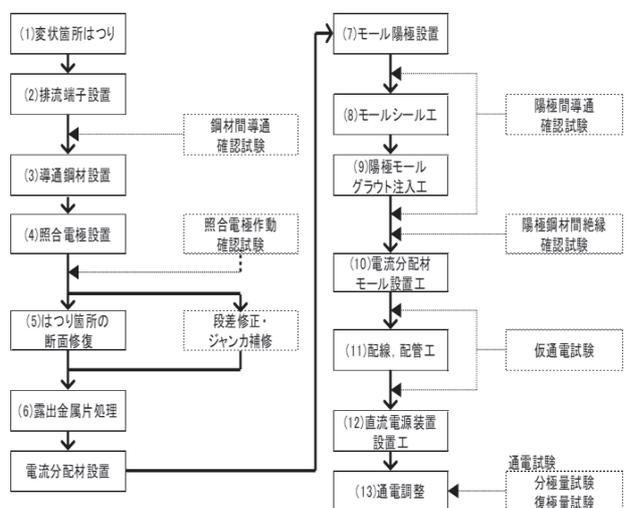


図-11 電気防食工 施工フロー

Fig.11 Flowchart of cathodic protection method

(1) 変状箇所はつり

道路桁下面の調査で確認したコンクリートの浮き・剥離範囲をカッターではつり取った。

(2) 排流端子設置

陽極から鉄筋に流れた電流を、直流電源装置へ帰流するための端子を設置した。

(3) 導通鋼材設置

(1)のはつり作業で露出した鉄筋に、防食電流が流れるか断面修復前に電流の導通を確認した。

(4) 照合電極設置

電流密度を測定し、電気防食の稼働状態を確認するためモニタリング機器を設置した。各回路の稼働状態を確認するため、8箇所(2箇所回路)設置した(図-12)。

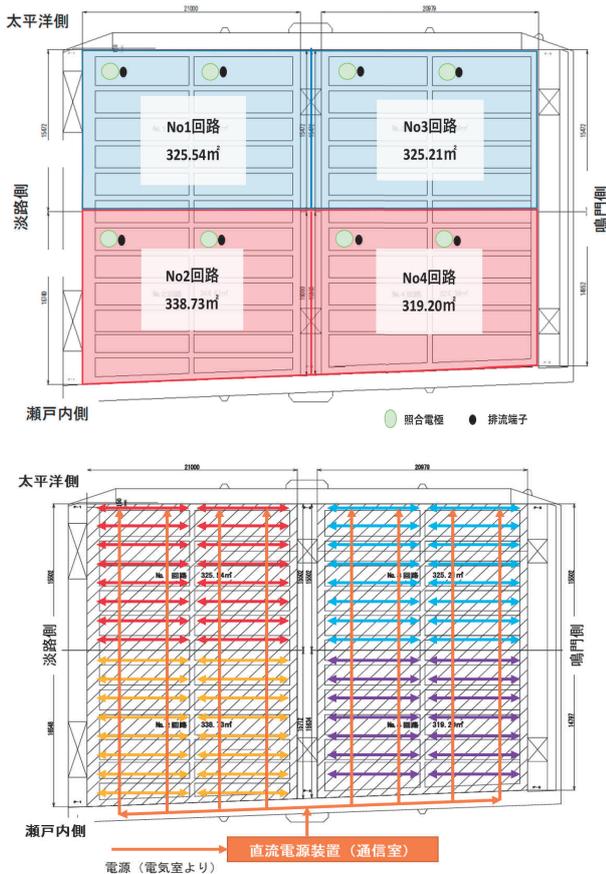


図-12 照合電極配置図及び配電イメージ

Fig.12 Reference electrode arrangement and power distribution

(5) はつり箇所の断面修復、段差修正・ジャンカ補修

はつり箇所に露出した鉄筋のさびは除去し、断面修復材を充填またはひび割れ注入を行った(写真-4)。

(6) 露出金属片処理

陽極設置面と電流分配材設置範囲(塗膜除去範囲)について、磁石により鉄筋や番線等の金属片を探査し、陽極と内部鉄筋の絶縁を確保した。

(7) モール陽極設置

モール陽極は、家庭で配線するケーブルモールに似た形状で内側に陽極材設置用の突起がついている。陽極材を通したモールは、床板下面の設置位置に樹脂製リベッ

トで躯体とモールの隙間がないよう固定した(図-13)。

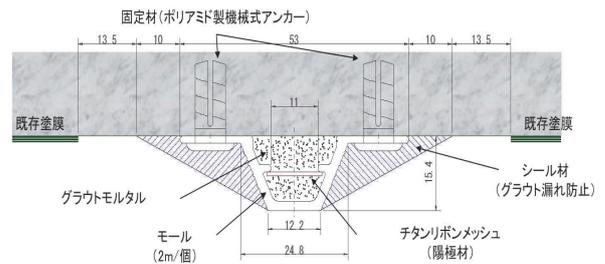


図-13 陽極構造図

Fig.13 Structural drawing of an anode

(8) モールシール工

モールを道路桁コンクリートに密着させ、グラウト注入時の漏出を防止するため、モール材両側に盛り付けた。

(9) 陽極モールグラウト注入工

モール端部の注入・排出口にチューブを取付け、グラウト材を注入した。同材注入時は、排出ホース先端からグラウト材の流出を確認後、硬化養生した(写真-5)。



写真-4 断面修復状況

Photo 4 The section restoration Situation



写真-5 グラウト注入

Photo 5 Grout injected

(10) 電流分配材設置工

電流分配材は陽極と交差させ、シール材を塗布して硬化後に電流分配材を樹脂釘で固定した。陽極材と電流分配材の交差部は、スポット溶接で接続した。

(11) 配線、配管工

直流電源装置からケーブルダクトを経由し、配線及び配管を設置し、床版裏面の各陽極・モニタリング機器に接続した。

(12) 直流電源装置設置工

電気防食の稼働状態を確認するため、1A通信機械室に直流電源装置を設置した。また、回路への通電が停止した場合、同装置の表示灯で確認できる(写真-6)。

(13) 通電調整

電気防食設備の設置完了後、通電開始に先立ち道路桁の防食に必要な電流量を決定する(写真-7)。



写真-6 直流電源設備設置

Photo 6 DC power source installed



写真-7 回路完了

Photo 7 Cathodic protection equipment completion

5. 電気防食の維持管理及び今後の課題

電気防食工法が適用されたコンクリート構造物の耐久性を確保するため、電気防食システム（以下「システム」という。）が適切に機能するよう維持管理を行う。

外部電源方式の場合、直流電流を常時通電させることからシステムの維持管理が必要となるため、電気化学的防食工法指針⁴⁾（以下「指針」という。）に基づく維持管理要領を策定した。

5.1 維持管理の手順

維持管理の手順について、図-14 に示す。システムの維持管理は、設計防食期間を通じ、健全に保たれていること、及び防食効果を確認することを基本とする。

上述の維持管理要領に基づき、点検、評価及び判定、対策、記録を行う。また、点検結果で十分な効果が得られない場合、対策の要否の判定を行い、必要に応じ維持管理の計画を見直すことも検討する。

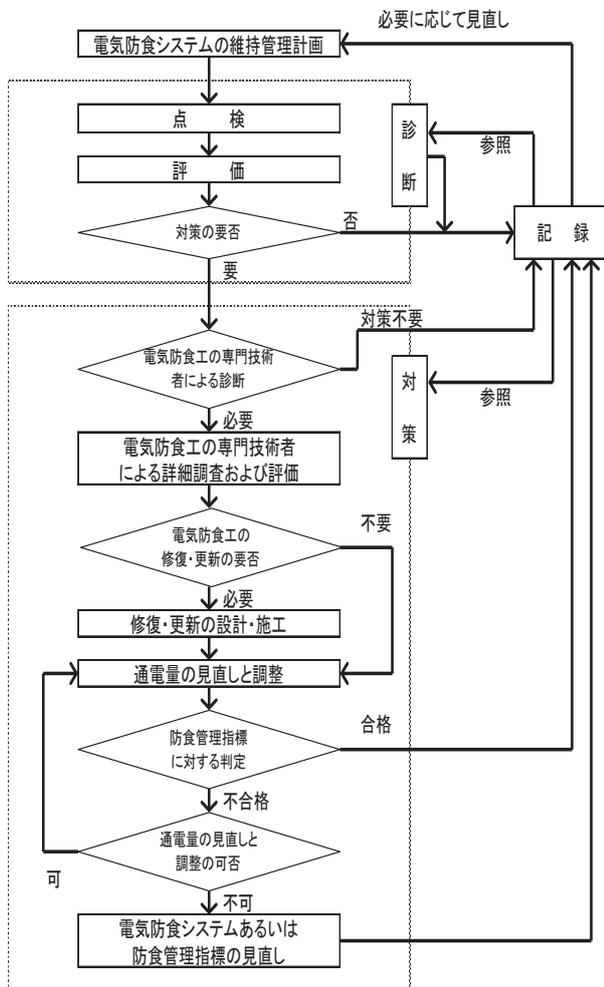


図-14 維持管理の手順フロー

Fig.14 Flow of a maintenance control system

5.2 点検種別及び内容

(1) 初期点検

電気防食の通電後1年以内にシステムの稼働及び防食

効果の確認を行う。ここでは、通電調整及び復極量試験を季節ごとに年4回実施する。

(2) 巡回点検

システムの稼働及び防食効果を外観により確認を行う。ここでは、システム及び防食効果の変状確認を年4回実施する。

(3) 定期点検

システムの稼働及び防食効果を、外観と通電量や鋼材の電位値の計測により確認を行う。ここでは、システムの健全性や防食効果を年1回実施する。

(4) 臨時点検及び異常時点検

落雷、災害、及び人的要因等でシステムに異常が生じた場合、必要の都度実施する。

5.3 維持管理の留意点

電気防食システムの導入した後も構造物の内部鋼材の周辺環境は変化するため、定期的に分極量と復極量を測定し、防食電流の見直しを判断する必要がある。また、通電量の見直しを行っても防食効果の確認が得られない場合、システムを見直す必要がある。具体的には、同システムの修復、更新、通電量の見直し等の検討を行う必要がある。さらに、自動計測記録装置や遠隔監視システムにより、維持管理の効率化を図ることも必要と考える。

6. おわりに

2021年11月に通電を開始し、現在、運用開始初年度に実施する初期点検を実施している。今後は、直流電源装置の稼働状況、防食効果を確認し維持管理を進め、経済的・効率的な維持管理を行い、お客様の安全・安心・快適に利用して頂くよう、適切な維持管理に努めていく所存である。

謝辞

本工事にあたり、森川英典神戸大学教授には、大鳴門橋の腐食環境を踏まえた適切な電気防食システムの維持管理等について多くのご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 酒井和吉, 石元靖二: 大鳴門橋 1A 道路桁補修工事, 本四技報, Vol.27, No.100, PP.15-21, 2003.3
- 2) 土木学会コンクリート委員会: コンクリート標準示方書【維持管理編】, 2018.10
- 3) 日本エルガード協会技術委員会: 最新コンクリート構造物の電気防食 Q&A, 2008.5
- 4) 土木学会コンクリート委員会: 電気化学的防食工法指針, 2020.10

塗替塗装を実施した橋梁における塗膜の劣化予測

Deterioration prediction of coating films on repainted bridges

大賀 弘貴 Hiroataka Oga

(株)ブリッジ・エンジニアリング
技術事業本部 技術部長

山根 彰 Akira Yamane

(株)ブリッジ・エンジニアリング
技術事業本部 技術部 技術第1課長

概要

1回目の塗替えが完了した因島大橋（平成7年度から平成17年度に施工）、大鳴門橋（平成10年度から平成18年度に施工）において、塗替え完了後15年（因島大橋の塗替え着手からは25年）以上経過しており、当初計画の2回目の塗替え予定時期が迫ってきている。塗替え実施済みの橋梁では、部材ごとの暴露環境の違いや刷毛塗り現場塗替塗装による膜厚の違い等により残存膜厚のバラツキが大きいことが想定されるため、残存膜厚の測定を行い、劣化予測により全面塗替えの実施時期を判定することとしている。本稿では、平成29年度（因島大橋）及び令和2年度（大鳴門橋）に行った残存膜厚測定の結果を基に、2橋の塗替え後塗膜の塗膜寿命予測を行い、全面塗替え計画の見直しの可能性を考察したので報告する。

More than 15 years have passed since the completion of the first repainting of the Innoshima Bridge (constructed from 1995 to 2005) and the Onaruto Bridge (constructed from 1998 to 2006), and the time for the second repainting, which was originally planned, is approaching. The remaining film thickness of bridges that have already been repainted is expected to vary greatly due to differences in the exposure environment of each component and differences in film thickness due to brush-on on-site repainting. In this paper, based on the results of residual film thickness measurements conducted in FY 2009 (Innoshima Bridge) and FY 2020 (Onaruto Bridge), the life expectancy of the coating films of the two bridges after repainting was estimated, and the possibility of revising the full repainting plan was discussed.

1. はじめに

本州四国連絡橋の海峡部長大橋は、外面塗装面積が約400万m²と膨大であり、塗替塗装費用は維持修繕費全体の約5割を占める。

海峡部長大橋の塗装仕様は、長期に耐久性が期待できる重防食塗装系を採用している(図-1)。この塗装系は、犠牲防食層に無機ジンクリッチペイント（以下「無機ジンク」という。）を用いて十分な防食性能を確保し、この犠牲防食層を保護するため、環境遮断性に優れた下塗りとしてエポキシ樹脂塗料を、更に中塗りを介して耐候性に優れたポリウレタン樹脂塗料又はふっ素樹脂塗料を上塗りとしている。この塗装系の補修は、無機ジンクの施工にブラスト処理や湿度管理などが必要となり、現場での塗替えが困難である。仮に塗替えると膨大な費用を要することから、無機ジンクを保護する下塗りが極力露

出しない段階までに中塗り、上塗り塗膜を塗替える予防保全を行うために、上塗りや中塗りが消耗し消失する時期を予測し(図-2)、この2層のみを塗替えることを基本としている。

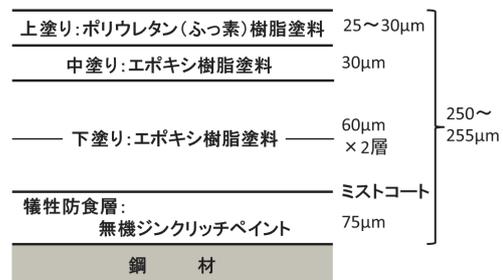


図-1 本州四国連絡橋の重防食塗装系
Fig.1 Heavy-duty coating for Honshu-Shikoku Bridges

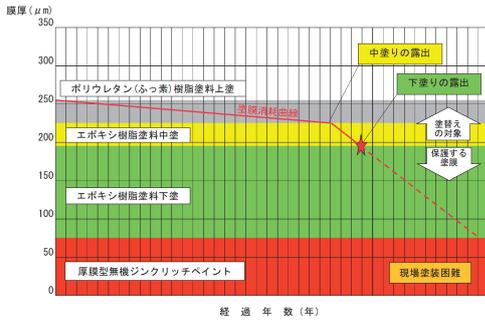


図-2 塗膜劣化予測イメージ
Fig.2 Concept of coating degradation prediction

塗装の予防保全は、無機ジンを保護する下塗りを極力消耗させないことが重要になるが、長大橋1橋を塗替えるには数年から10年程度の期間を要するため、重防食塗装系の塗膜消耗により塗膜が消失するまでの期間を式(1)により予測している¹⁾。その劣化予測のフローは図-3に示すとおりであり、消耗速度、残存膜厚の調査で得られたデータから確率分布モデルを作成し、モンテカルロシミュレーションを行って、塗膜の限界状態（下塗りが局所的に消失し、無機ジンの露出面積率が工学的に見て十分小さいと考えられる0.1%になり始める時¹⁾）に至る時期を予測し、それまでに塗替えが完了するように塗替え時期を設定することで塗装の維持管理を行っている。

$$\text{塗膜消失期間} = \frac{\text{残存膜厚}}{\text{消耗速度}} \quad (1)$$

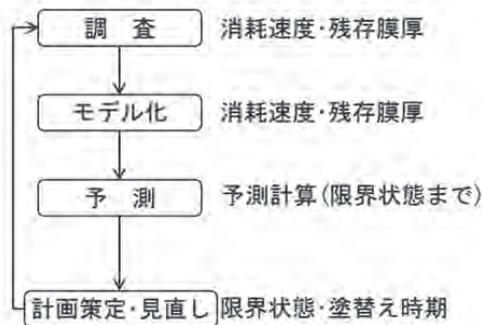


図-3 劣化予測フロー
Fig.3 Deterioration prediction flow

モンテカルロシミュレーションによる塗膜劣化予測は、部材ごとの暴露環境の違いや刷毛塗り現場塗替塗装による膜厚差、建設時の塗装仕様(塗膜構成)の違いや残存膜厚のバラツキを考慮して行う必要があることから、因島大橋と大鳴門橋の2橋についてモンテカルロシミュレーションによる塗膜寿命予測を行った。

2. 塗替え後塗膜の実態調査

2.1 因島大橋

昭和58年に供用した因島大橋は、平成7年度から17年度にかけて補剛桁の塗替えを実施した。塗替え時の塗装仕様を表-1に、建設時の塗装仕様を表-2に示す。

表-1 因島大橋塗替え時の塗装仕様及び乾燥膜厚

Table 1 Coating specifications and dry coating at the time of repainting

素地調整	第1層	第2層	第3層	第4層	総膜厚
4種ケレン	-	-	エポキシ樹脂中塗 (30 μm)	ふっ素樹脂上塗 (25 μm)	55 μm

表-2 因島大橋建設時の塗装仕様及び乾燥膜厚

Table 2 Coating specifications and dry coating at the time of construction

素地調整	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層	総膜厚
製品プラスト	厚膜型無機ジンクリッチペイント (75 μm)	ミストコート (-)	厚膜型エポキシ樹脂下塗 (60 μm)	厚膜型エポキシ樹脂下塗 (60 μm)	ポリウレタン用中塗 (30 μm)	ポリウレタン上塗 (30 μm)	255 μm (無機ジンを除く180 μm)

塗替え後塗膜の残存膜厚調査は、塗替え完了後12年が経過した平成29年度に実施した。調査は保全管理要領に基づき塗膜各層の残存膜厚を定量的に把握するため、カット式膜厚計等により300箇所以上実施しており、その調査箇所及び結果は図-4、表-3に示すとおりである。なお、表-3の結果については無機ジンの膜厚を除いた結果である。

表-3 因島大橋残存膜厚調査結果(無機ジンク除く)

Table 3 Results of survey on residual coating thickness of Innoshima Bridge (excluding inorganic zinc)

	補剛桁	鋼床版	全データ
データ数	186	132	318
平均値(μm)	320.4	335.8	326.8
最大値(μm)	642.4	801.8	801.8
最小値(μm)	168.4	174.8	168.4
標準偏差(μm)	67.5	83.3	74.7
建設時設計膜厚(μm)	180		

表-3を見ると、全調査箇所の平均総膜厚が約330 μmとなっており、建設時の無機ジンク層を除く設計膜厚180 μmに対して、約1.8倍の厚さであることが確認された。また、調査箇所の中には最大で約800 μmの膜厚が残っている箇所や、最小で約170 μmの箇所も存在しており、総膜厚が厚い箇所はかなり厚く、薄い箇所は設計膜厚より薄いという結果であった。ここで、それぞれの箇所についての調査写真の例を図-5に示す。

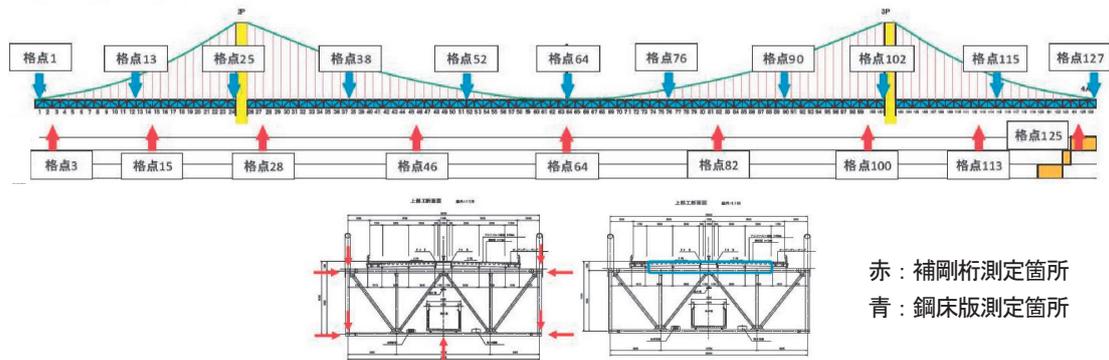


図-4 因島大橋残存膜厚調査箇所

Fig.4 Innoshima Bridge coating remaining coating thickness survey location

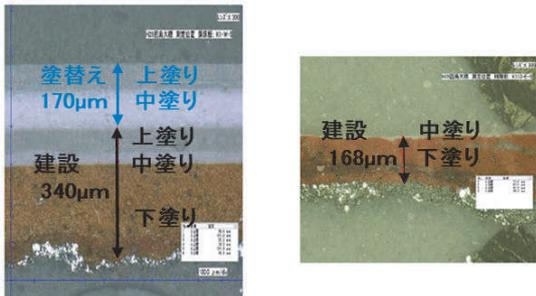


図-5 厚い膜厚箇所例(鋼床版縦桁) (左)と
薄い膜厚箇所例(主構垂直材南面) (右)
Fig.5 Example of thick coating thickness (left)
and thin coating thickness (right)

図-5を見ると、総膜厚が厚い箇所は、建設時に設計膜厚よりかなり厚く塗られている部分に塗替え時においても、建設時の上塗り、中塗り塗膜が残存した状態で更に塗替えの塗膜が設計膜厚より厚く塗られたことで、調査時点の膜厚に至ったものと考えられる。総膜厚が薄い箇所については、暴露環境等の条件により建設時の上塗りは全て消耗しており、塗替え時の塗膜も塗替え後の暴露環境等により全て消耗した状態であるものと考えられる。このように、残存膜厚は建設時や塗替え時の膜厚や暴露環境等の条件により、バラツキが大きくなっていることが確認された。

2.2 大鳴門橋

昭和60年に供用した大鳴門橋は、平成10年度～18年度にかけて補剛桁と主塔の塗替えを実施しており、塗替え時の塗装仕様及び建設時の塗装仕様は、因島大橋と同様である。

塗替え後塗膜の調査を塗替え完了後14年が経過した令和2年度に実施し、残存膜厚を測定した。調査は因島大橋の場合と同様に300箇所以上実施しており、その調査箇所及び結果は図-6、表-4に示すとおりである。なお、この結果については因島大橋の場合と同様無機ジンの膜厚を除いた結果である。

表-4 大鳴門橋残存膜厚調査結果(無機ジンク除く)
Table 4 Results of survey on residual coating thickness of Onaruto Bridge (excluding inorganic zinc)

	主塔	補剛桁	鋼床版	全データ
データ数	12	213	84	309
平均値(μm)	412.9	325.4	287.9	318.6
最大値(μm)	571.9	637.6	545.9	637.6
最小値(μm)	273.7	173.1	98.0	98.0
標準偏差(μm)	83.1	75.4	97.1	85.7
建設時設計膜厚(μm)	180			

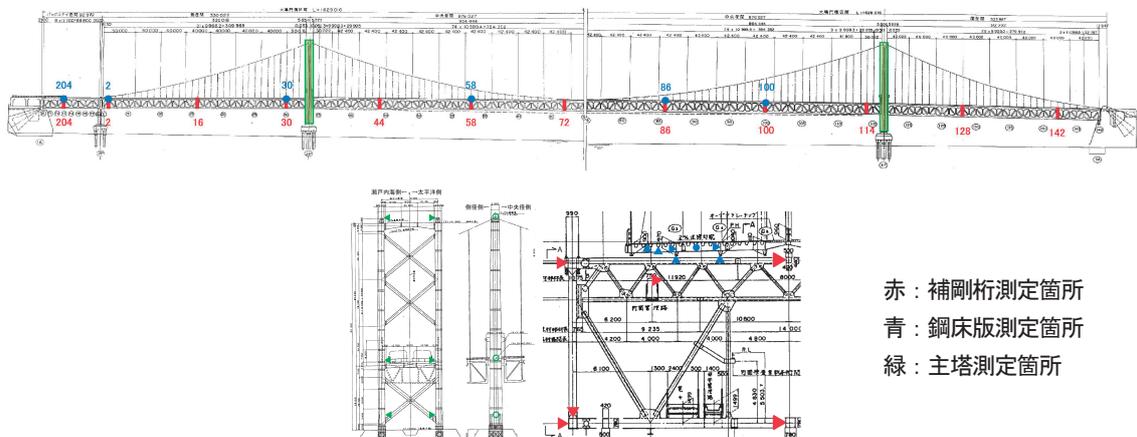


図-6 大鳴門橋残存膜厚調査箇所

Fig.6 Onaruto Bridge coating remaining coating thickness survey location

表-4を見ると、全調査箇所平均総膜厚が約320 μm となっており、建設時の無機ジンク層を除く設計膜厚180 μm に対して、約1.8倍の厚さであることが確認された。また、調査箇所の中には最大で約640 μm の膜厚が残っている箇所や、最小で約98 μm の箇所も存在している。それぞれの箇所についての調査写真の例を図-7に示すように、大鳴門橋においても因島大橋と同様に、建設時や塗替え時の膜厚や暴露環境等の条件により、バラツキが大きくなっていることが確認された。

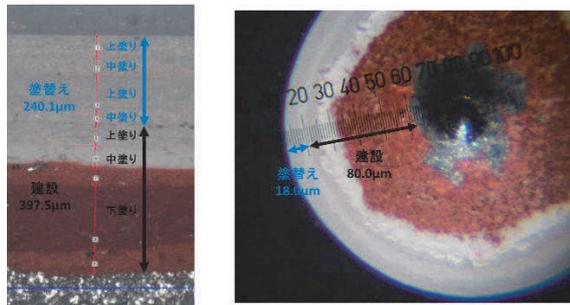


図-7 厚い膜厚箇所例(下弦材上面) (左)と薄い膜厚箇所例(鋼床版横桁腹板) (右)
Fig.7 Example of thick coating thickness (left) and thin coating thickness (right)

3. 塗替え後塗膜の塗膜寿命予測

3.1 塗膜の膜厚分布

塗膜の寿命予測を行うためには、式(1)のとおり残存膜厚と消耗速度により求めることとなる。ここで残存膜厚は調査部位ごとのバラツキが大きいため、統計学的手法による処理を行い算出した。算出方法については、大塚らが開発した塗膜の寿命予測手法を参考にしたり¹⁾。今回は、因島大橋と大鳴門橋は同様の処理により塗膜寿命予測を行うため、本節では因島大橋を例に述べる。

因島大橋残存膜厚調査の詳細結果(一部抜粋)を表-5に示す。

表-5 因島大橋残存膜厚調査の詳細結果(一部抜粋)
Table 5 Detailed results of the survey on the residual coating of the Innoshima Bridge (partial excerpt)

部材・面	ジンク	実測膜厚(μm)										合計 ジンク除く	合計 ジンク含む	
		建設時塗膜					塗替え塗膜							
		下塗り	下塗り	下塗り	中塗り	上塗り	1	2	3	中塗り	上塗り			
上弦材 上面	75	20.3	30.5	71.2	60.4	76.9				0.0	38.1	35.6	333.0	408.0
上弦材 海側側面	75	16.5	24.8	69.3	104.8	45.1				0.0	40.0	26.1	326.6	401.6
下弦材 上面	75	33.0	29.2	78.2	43.2	26.7				0.0	26.1	26.1	262.5	337.5
下弦材 海側側面	75			欠測	131.5	36.9	0.0	115.0	67.4	38.8	39.4	18.4	447.4	522.4
斜材 上面(本州側)	75	15.3	35.6	56.6	74.3	48.9				0.0	51.5	21.8	303.8	378.8
斜材 上面(四国側)	75	31.1	38.1	41.3	97.2	0.0				0.0	36.9	16.5	261.1	336.1
垂重材 北面	75	23.5	30.5	51.5	63.5	28.6				0.0	22.9	24.8	245.3	320.3
垂重材 南面	75	12.7	42.6	52.7	73.1	36.9				0.0	23.5	23.5	265.0	340.0

建設時塗膜を見ると、下塗りが3層になっているが、下塗り1についてはミストコート層であり設計膜厚に含まれないため、塗膜寿命予測計算及び統計処理の対象か

らは除外し、建設時塗膜は上塗りから下塗り2までとした。また塗替え塗膜については、一部中塗り以下の層も存在する多層の箇所があるが、局部補修された箇所であることが考えられた。そのため、上塗り及び中塗りとは比べ絶対数が少ないことから、中塗り以下の層は1及び2は下塗り1(建設時膜厚)と同様に除外し、膜厚としては3(以下「3(塗替え塗膜)」という。)のみを塗替え下塗りの残存膜厚として扱うことで塗膜寿命予測計算及び統計処理を行った。

塗膜の各層ごとの残存膜厚分布を図-8及び図-9に示す。図-8、図-9を見ると、建設時塗膜の各層と塗替え塗膜の中塗り、上塗りは、対数正規分布に従っていることが分かる。しかし、3(塗替え塗膜)については対数正規分布に従わない結果となった。この理由として、3(塗替え塗膜)の層は一般部の塗替え塗装仕様では塗布されない層であるため、その一般部をターゲットとした残存膜厚調査箇所としては、存在する絶対数が少なく、存在しない箇所は0 μm としてカウントされているためであると考えられる。

この3(塗替え塗膜)は、確率分布を対数正規と仮定した塗膜寿命予測計算には使用できないため、各測定点の下塗り2(建設時塗膜)及び下塗り3(建設時塗膜)の膜厚と合算した下塗り合計(下塗り2(建設時塗膜)+下塗り3(建設時塗膜)+3(塗替え塗膜))で、確率分布を求めた。その結果を図-10に示す。

図-10を見ると、下塗り合計とした膜厚層は対数正規分布に従う結果となったことから、下塗り合計で確率分布モデルを作成し、計算することとした。因島大橋及び、大鳴門橋の各層の残存膜厚平均値とその標準偏差の計算結果は、表-6に示すとおりとなった。

表-6 統計処理により算出した因島大橋及び大鳴門橋の残存膜厚値

Table 6 Remaining film thickness values for the Innoshima and Onaruto Bridges calculated by statistical processing

	因島大橋 (平成29年度調査結果)		大鳴門橋 (令和2年度調査結果)	
	残存膜厚 平均値(μm)	残存膜厚 標準偏差(μm)	残存膜厚 平均値(μm)	残存膜厚 標準偏差(μm)
下塗り合計	136.1	53.7	136.9	55.4
中塗り(建設時塗膜)	49.3	20.9	42.3	18.4
上塗り(建設時塗膜)	44.8	21.0	44.2	26.1
中塗り(塗替え塗膜)	45.5	21.3	32.3	15.1
上塗り(塗替え塗膜)	27.2	13.7	33.0	15.4
合計 無機ジンク除く	302.9		288.7	

3.2 塗膜の寿命予測

前節で統計処理により算出した残存膜厚値(表-6)及び、過年度の調査によって算出した塗膜各層の塗膜消耗速度(表-7)を用いて、因島大橋及び大鳴門橋の塗膜寿命の予測年数を試算した。なお、過去の検討より塗膜消耗速度は正規分布でおおむねモデル化できることが確認されている¹⁾。試算に際しては、参考文献1)に示される寿命年数算出方法を参考に式(2)を使用した統計学

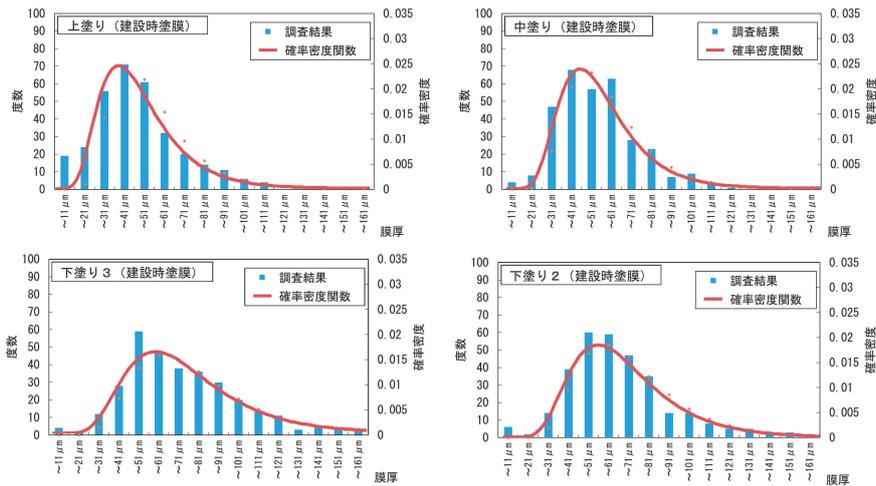


図-8 因島大橋塗膜の各層ごとの残存膜厚分布(建設時塗膜)

Fig.8 Distribution of residual coating film in each layer of the Innoshima Bridge (at the time of construction coating)

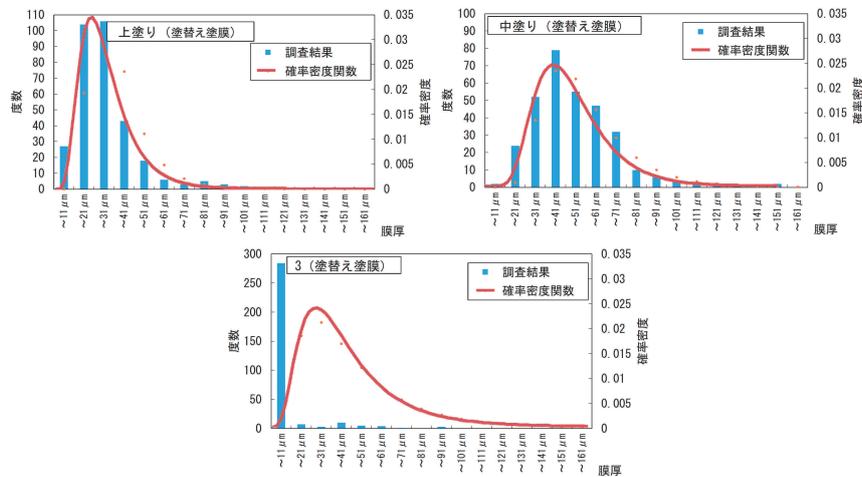


図-9 因島大橋塗膜の各層ごとの残存膜厚分布(塗替え塗膜)

Fig.9 Distribution of residual coating film in each layer of the Innoshima Bridge (repainting coating)

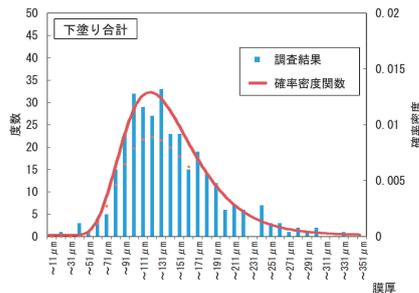


図-10 下塗り合計(下塗り2+下塗り3(建設時塗膜)+3(塗替え塗膜))の残存膜厚分布

Fig.10 Distribution of residual coating film in total undercoat (undercoat2+ undercoat3+3(repainting coating))

的手法¹⁾により行った。

$$T_i = at_i / av_i + bt_i / bv_i + ct_i / cv_i + dt_i / dv_i + et_i / ev_i \quad (2)$$

ここに、 $i : 1 \sim n$

T_i : i 番目の塗膜寿命年数

at_i : 合計下塗り残存膜厚の i 番目の乱数

表-7 各層の塗膜消耗速度

Table 7 Coating wear rate of each coating layer

	塗膜消耗速度 平均($\mu\text{m}/\text{年}$)	標準偏差 ($\mu\text{m}/\text{年}$)	備 考
下塗り	5.57	2.43	令和元年度調査 (大鳴門橋・櫃石島橋・因島大橋)
中塗り	5.15	2.06	
上塗り・ホリウレタ	0.54	0.17	平成21、23年度調査(生口橋・大島大橋)
上塗り・従来ふっ素樹脂	0.36	0.03	令和2年度調査(明石海峡大橋)

av_i : 合計下塗り消耗速度の i 番目の乱数

bt_i : 中塗り(建設時塗膜) 残存膜厚の i 番目の乱数

bv_i : 中塗り(建設時塗膜) 消耗速度の i 番目の乱数

ct_i : 上塗り(建設時塗膜) 残存膜厚の i 番目の乱数

cv_i : 上塗り(建設時塗膜) 消耗速度の i 番目の乱数

dt_i : 中塗り(塗替え塗膜) 残存膜厚の i 番目の乱数

dv_i : 中塗り(塗替え塗膜) 消耗速度の i 番目の乱数

et_i : 上塗り(塗替え塗膜) 残存膜厚の i 番目の乱数

ev_i : 上塗り(塗替え塗膜) 消耗速度の i 番目の乱数

塗膜寿命年数の試算はモデル化した残存膜厚及び塗膜

消耗速度を用いて、統計学的手法により塗膜が消失し無機ジンクが露出し始める限界状態に至る時期をシミュレーションすることで行う。残存膜厚は対数正規分布に従い、塗膜消耗速度は正規分布に従うものとしてモデル化しており、式(2)では乱数を $n(=1,000万)$ 個発生させ、塗膜寿命年数 T_i の計算を n 回実施する。算出する塗膜寿命年数 T は T_i の小さい方から数えて $n \times 0.1\%$ (無機ジンク露出面積率 0.1%) $=1万$ 番目となる。

試算の結果、因島大橋は平成29年度時点、大鳴門橋は令和2年度時点ではあるが、それぞれ橋全体として約70年程度の塗膜寿命年数となった。なお、式(2)は大塚らが開発した寿命年数算出方法を基に塗替塗装を入れ多層化していること、元々の寿命年数算出方法は予測精度15年 \pm 1年で設定されているが、今回算出した塗膜寿命年数は長期であることから、この年数には計算上の誤差を多く含んでいることが考えられる。そのため、この塗膜寿命年数はある程度の目安とする参考値であることに注意されたい。この試算結果及び残存膜厚調査結果により、建設時の上塗りが平均で約 $45\mu\text{m}$ 、塗替え時の上塗りが平均で約 $30\mu\text{m}$ 、総膜厚でも平均で約 $300\mu\text{m}$ 残っていることが確認されているため、塗膜消耗から考えた塗膜寿命は長期であると考えられる。この結果から、2橋とも橋全体では塗替え周期が長期化できる可能性があることが推測された。しかし、2.1や2.2で述べたように部位によっては、全体の残存膜厚平均よりかなり薄い箇所も存在するため、そのような箇所については適宜部分塗替塗装を行っていく必要があると考えられる。

一方で、塗替塗装のリスクとして、1)膜厚が薄くなり無機ジンクが露出するリスク、2)膜厚が厚くなり塗膜割れが発生するリスクの2つが主に考えられる。特に2)のリスクについては、総膜厚が $1000\mu\text{m}$ を越えると塗膜割れのリスクが増加することが知られている²⁾。3.2の試算結果及び表-6から、残存膜厚中の上塗り平均膜厚が建設分約 $45\mu\text{m}$ 、塗替え分約 $30\mu\text{m}$ 程度と多く残っており、表-3及び表-4からも総膜厚 $600\mu\text{m}$ を越えて膜厚が残っている箇所が存在していることから、十分な残存膜厚がある時点で塗替えを行うことは過膜厚による2)のリスクが増大する可能性があると考えられる。また、今回試算した塗膜寿命年数は、残存膜厚に対して紫外線等の外的要因による塗膜消耗を前提とした考え方であり、塗膜消耗以外の劣化形態(凝集破壊や塗膜剥離等)が考慮されていないことにも留意する必要がある。そのため、因島大橋及び大鳴門橋においては、「発錆等の塗膜劣化部の局部補修塗装」や「紫外線等の影響が大きく塗膜消耗が進んでいる部分の部分塗替塗装」を優先し、全面塗替えの周期を長期化することで、LCCを低減できる可能性があると考えられる。また、塗膜の劣化状況を把握するため継続した塗膜調査を実施することが望ましいと考えられる。

4. おわりに

1回目の塗替塗装が完了した因島大橋、大鳴門橋について、過去に行った残存膜厚測定の結果を基に、統計学的手法による塗膜寿命の年数予測を行い、それぞれの橋梁の塗膜寿命年数を試算した。その結果、2橋とも橋全体では塗替え周期が長期化できる可能性があることが分かった。また、これまでの想定より塗膜各層の塗膜消耗速度が小さいため、十分な残存膜厚がある時点で塗替えを行うと総膜厚がかなり大きくなり、塗膜割れのリスクが増加する可能性があると考えられる。なお、経年により塗膜消耗以外の劣化形態が発生してくる可能性もあるため、継続的な塗膜の状況把握を行うことが望ましいと思われる。

今後、さらにデータを蓄積し、塗膜寿命予測手法の検証及び高度化に取り組んでいきたい。

参考文献

- 1) 大塚雅裕, 楠原栄樹: 重防食塗装の劣化予測手法の開発, 構造工学論文集, 土木学会, Vol.62A, 2016.3
- 2) 土木学会: 大気環境における鋼構造物の防食性能回復の課題と対策, 鋼構造シリーズ30, 2019.7

ETCデータを用いたコロナ禍における 本四高速道路の利用目的分析

Analysis utilizing ETC data on the purpose for use of the Honshu Shikoku Bridge Expressways
during the COVID-19 pandemic

田中 輝良 Akira Tanaka 前島 一陸 Kazumichi Maeshima

企画部 経済調査課長代理

企画部 経済調査課長

概要

本州四国連絡高速道路（以下「本四高速道路」という。）の2020年の交通量は、コロナ禍の影響により減少している。特に、緊急事態宣言が全国に発令されていた4月・5月は対前年比で約40%～50%減少している。その後、徐々に回復傾向がみられたが、2020年12月時点ではコロナ禍以前の水準には至っていない。

このような状況のなか、コロナ禍における本四高速道路の利用状況を把握するために、ETCデータを用いて利用車種、利用区間、利用頻度等の情報から通行車両を「業務」・「生活」・「観光帰省」の3つの目的別に分類・集計した。

本稿では、コロナ禍における本四高速道路の利用目的別の傾向について報告する。

The traffic volume of the Honshu-Shikoku Bridge Expressways in 2020 decreased under the COVID-19 pandemic. Especially, the traffic volume of April and May during the state of emergency were decreased by 40%-50% year-on-year. After the state of emergency, the traffic volume has gradually recovered, but as it, has not fully recovered compared to the previous year.

Under these circumstances, in order to grasp the usage of the Honshu-Shikoku Bridge Expressways under the COVID-19 pandemic, we analyzed and categorized the traffic into three purposes, "business," "everyday life," and "sightseeing and homecoming," based on information derived from the ETC data such as the type of vehicle, the section used, and the frequency of use.

This report describes the trend of purpose for use of the Honshu-Shikoku Bridge Expressways during the COVID-19 pandemic..

1. はじめに

本州四国連絡高速道路（以下「本四高速道路」という。）の2020年の交通量は、コロナ禍における緊急事態宣言や帰省の自粛要請等による影響を受け、減少している。こうした状況のなか、コロナ禍における交通量減少の傾向や、アフターコロナの交通量の回復基調についての分析を実施するためには、本四高速道路の利用状況を把握することが重要である。そこで、車両の走行履歴を把握することが可能なETCデータに着目し、本四高速道路を利用する車両を利用目的別に分類する手法についての検討を実施した。本稿は、その分類手法と、分類の結果から確認できたコロナ禍における本四高速道路の利用状況について報告するものである。

2. コロナ禍における交通量の推移

2019年、2020年における本四高速道路の月別出口交通量を図-1に示す。コロナ禍の影響による交通量の減少は2020年3月より確認できる。特に、4月16日に全国で緊急事態宣言が発令されて以降、4月・5月の交通量は対前年比で約40%～50%減少している。その後、5月25日に全国で緊急事態宣言が解除されて以降は徐々に回復傾向がみられ、7月22日からGo To トラベルキャンペーンが開始されたこともあり、10月には対前年比で約94%まで回復した。しかし、第三波による感染者の再拡大により、12月28日にはGo To トラベルキャンペーンが全国で一斉停止され、コロナ禍以前の水準までは回復していない。

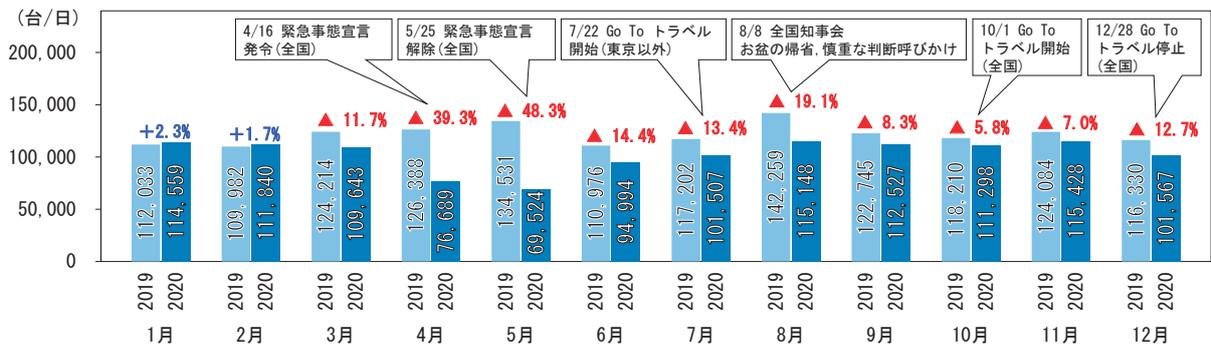


図-1 月別出口交通量
Fig.1 Monthly traffic volume at exit

小型車（普通車+軽自動車等）、大型車（大型車+特
大車+中型車）別の傾向について、2020年の対前年比車
種別出口交通量を図-2に示す。車種別においても、緊
急事態宣言発令下の4月・5月に最も減少しているのは同
様であるが、小型車の交通量の減少は大型車と比較し顕
著である。また、緊急事態宣言が解除された6月以降は、
小型車ではGo To トラベルキャンペーンの開始・停止や、
全国知事会によるお盆の帰省についての慎重な判断の呼
びかけ等に相関して推移している。

一方、6月以降の大型車の交通量は対前年比90%以上
で推移している。これはエッセンシャルワーカーである
運輸・物流業者等による利用が多いことが想定される。
そこで、大型車の交通量のより詳細な傾向を把握するた
め、ETCデータの利用車種情報により「貨物車」、「高
速路線バス等」、「観光バス」ごとに整理した。ETC
データの利用車種一覧を表-1に示す。中型車、大型車、
特大車のうち、利用車種一覧による車両区分が貨物系
のものを「貨物車」に、また、大型車のうち乗用系のも
のを「高速路線バス等」、特大車のうち乗用系のものを
「観光バス」に分類し、大型車車種別ETC出口交通量を
整理した（図-3）。「貨物車」では、緊急事態宣言が
発令されていた5月に交通量が最も減少しているが、そ
の減少率は対前年比で90%程度にとどまり、その後は前
年並みの交通量で推移している。このことから、上述の
とおり、エッセンシャルワーカーである運輸・物流業者
等による利用が多いと想定される「貨物車」においては
コロナ禍による影響をほとんど受けていないことがわか
る。

一方、「高速路線バス等」、「観光バス」では、最も
交通量が減少した5月では対前年比でそれぞれ30%、6%
と緊急事態宣言発令下の外出自粛等の影響を大きく受け
ている。6月以降は徐々に回復傾向がみられるが、12月
時点では対前年比で約60%~70%ことどまってお
り、コロナ禍以前の水準には至っていない。

3. 利用目的分類手法

ETCデータを用いることで、本四高速道路の利用状況
を把握することが可能である。ETCデータには利用車種
のほかに、利用した路線・ICやナンバー情報等が含まれ
ており、これらの情報から利用区間や利用頻度といった
車両の走行履歴を把握することが可能である。そこで、
コロナ禍における本四高速道路の利用状況を把握するた
め、上述のETCデータの情報をを用いて、本四高速道路を
利用した車両の利用目的を推定し分類する方法について
検討した。

3.1 ETCデータ

ETCデータには、入口・出口の路線・IC、それぞれの
通過日時、利用車種や車載器ID、ナンバー情報等が含
まれており、車両1台あたりの入口・出口IC区間の走行
（以下「トリップ」という。）が記録される。利用車種
は表-1に示した利用車種一覧によるものであり、車種、

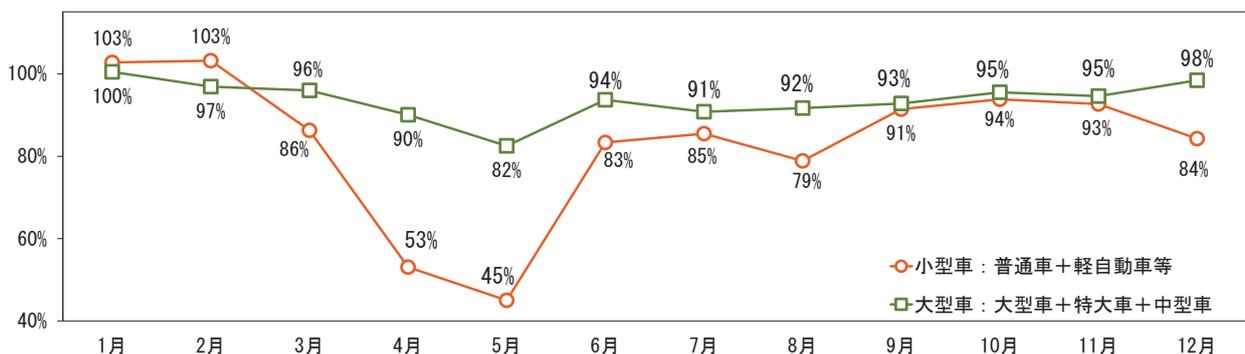


図-2 車種別出口交通量 (2020年・対前年比)
Fig.2 Monthly traffic volume at exit by vehicle classification (2020・year-on-year)

表-1 利用車種一覧
Table 1 List of vehicle classification

車種コード		車種	車両区分	自動車の種類
下一桁が偶数	下一桁が奇数			
自家用	営業用	軽自動車等	二輪	・二輪自動車（126cc以上・側車付き含む）
			乗用系 貨物系	・軽自動車
		普通車	乗用系	・小型自動車 ・普通乗用自動車
			貨物系	・トレーラ（けん引軽自動車と被けん引自動車（1車軸との連結車両））
		中型車	乗用系	・普通貨物車両（総重量8t未満かつ最大積載量5t未満で3軸車以外のもの） ・普通貨物車両（被けん引自動車を連結していないセミトレーラ用トラクターで2車軸のもの）
			貨物系	・乗合型自動車（マイクロバス（乗車定員11人以上29人以下で車両総重量8t未満のもの）） ・トレーラ（けん引軽自動車と被けん引自動車（2車軸以上）との連結車両） ・トレーラ（けん引普通車と被けん引自動車（1車軸）との連結車両）
		大型車	乗用系	・普通貨物自動車（車両総重量8t以上又は最大積載量5t以上で3軸車以下のもの） ・普通貨物自動車（車両総重量25t以下かつ4車軸のもの）
			貨物系	・乗合型自動車（バス（乗車定員30人以上又は車両総重量8t以上の路線バス）） ・乗合型自動車（バス（車両総重量8t以上で乗車定員29人以上かつ車長9m未満のもの）） ・トレーラ（けん引普通車と被けん引自動車（2車軸以上）との連結車両） ・トレーラ（けん引中型車と被けん引自動車（1車軸）との連結車両） ・トレーラ（けん引大型車（2車軸）と被けん引自動車（1車軸）との連結車両）
		特大車	乗用系	・普通貨物自動車（4軸車以上で大型に区分されている普通貨物自動車以外のもの） ・トレーラ（けん引中型車と被けん引自動車（2車軸以上）との連結車両）
			貨物系	・トレーラ（けん引大型車と被けん引自動車との連結車両で車軸数の合計が4車軸以上のもの） ・トレーラ（特大車がけん引する連結車両）
			特殊車	・乗合型自動車（バス（乗車定員30人以上のもの（路線バスを除く））） ・乗合型自動車（バス（車両総重量8t以上で車長9m以上のもの（路線バスを除く））） ・大型特殊自動車

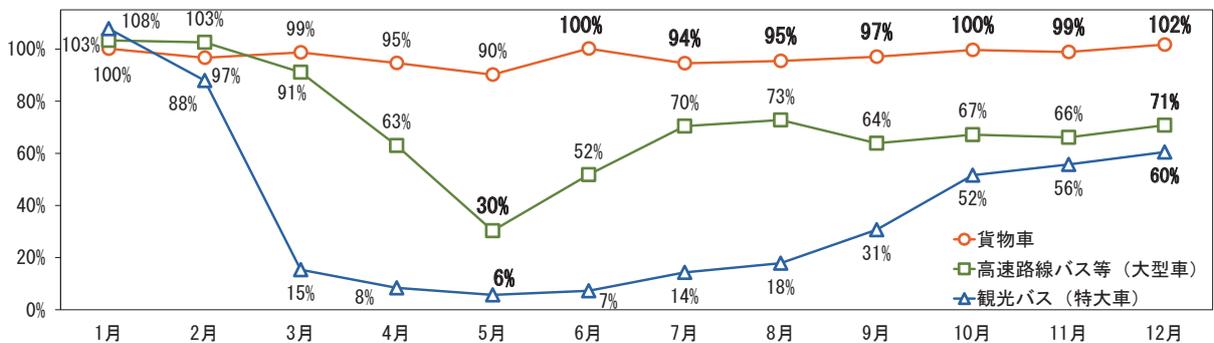


図-3 大型車車種別 ETC 出口交通量 (2020年・対前年比)
Fig.3 Monthly traffic volume at exit using ETC by vehicle classification of large vehicles (2020-year-on-year)

車両区分及び自動車の種類ごとに3桁の数字で構成される車種コードが割り当てられている。なお、車種コードの下一桁が偶数の場合は自家用に、奇数の場合には営業用に分類される。また、車載器IDは個車の特定が可能となっており、同一車両が1ヵ月あたり本四高速道路を何回利用したか、いつ利用したか及びそれぞれの利用区間等、走行履歴を把握することが可能である。表-2には本検討で用いたETCデータの概要を示す。

3.2 利用目的分類フロー

3.1で述べたETCデータに含まれる情報を用いて、本四高速道路を利用した車両を「業務」・「生活」・「観光帰省」の3つの利用目的別に分類・集計を行った。利用目的の分類フローを図-4に示す。

表-2 ETC データ概要
Table 2 Outline of ETC data

対象範囲	本四高速道路全線
対象期間	2019年1月～2020年12月（24ヵ月間）
抽出項目	利用路線、入口IC、出口IC、入口IC通過日時、出口IC通過日時、利用車種、車載器ID、ナンバー情報

3.3 除外車両の判定 (利用目的分類フロー1)

同一車両において、利用車種の車種コードが異なるデータが存在する場合は、車種異常とし、集計の対象外とした。

また、自動車の種類がバス、特殊車の場合及び同一トリップ内で本州→四国→本州のように本州四国間を往復している場合は、利用目的を推定することが困難であるため、集計の対象外とした。同様の理由から、自動車の種類が二輪車の場合、及びナンバー情報からレンタカーだと判断できる場合（ナンバー情報の「かな」が貸渡用（わ・れ）の場合）には、集計の対象外とした。

3.4 利用車種による判定 (利用目的分類フロー2)

車種コードの下一桁が奇数（営業用）である場合、もしくは車両区分が貨物系である場合には、「業務」に分類した。

3.5 利用頻度等による判定

1ヶ月あたりの本四高速道路の利用頻度が1～3回、4～31回、32回以上の車両を抽出し、それぞれ少頻度利用、中頻度利用、多頻度利用と定義した。なお、それぞれの



図-4 利用目的分類フロー
Fig.4 Flowchart to classify the purpose to use

閾値は、少頻度利用と中頻度利用を2往復/月=4回、中頻度利用と多頻度利用を4日/週×4週/月×1往復=32回、と設定した。

(1) 少頻度利用車両 (1~3回/月) の判定
(利用目的分類フロー 3)

少頻度利用車両のうち、1回でも本州⇄四国間、本州⇄島しょ部間、四国⇄島しょ部間を移動するトリップがある場合には「観光帰省」に分類し、それ以外の本州⇄本州間、四国⇄四国間及び島しょ部⇄島しょ部間のみを移動するトリップの場合には「生活」に分類した。なお、島しょ部には淡路島を含んでいる。

(2) 中頻度利用車両 (4~31回/月) の判定
(利用目的分類フロー 4)

中頻度利用車両のうち、本四高速道路の出口IC通過日時が同日のトリップが4回以上ある場合、もしくは平日のみのトリップの場合には「業務」に分類し、それ以外の場合には「生活」に分類した。

(3) 多頻度利用車 (32回~/月) の判定
(利用目的分類フロー 5)

多頻度利用車両のうち、入口・出口ICが同一のトリップが32回以上の場合には、通勤等による利用であると想定し、「生活（通勤）」に分類した。入口・出口ICが同一のトリップが32回未満の場合には「業務」に分類した。また、1ヵ月あたりの利用頻度が63回以上の車両については、1日あたり2回以上本四高速道路を利用している可能性が考えられるため「業務」に分類した。

4. 利用目的分類結果

4.1 コロナ禍における利用目的別交通量の推移

3. で述べた分類手法に従って、本四高速道路全体の2019年、2020年における利用目的別交通量の推移について整理した。月別利用目的別交通量を図-5に示す。

各利用目的別に共通して4月・5月の交通量が対前年比で大きく減少しているが、「業務」においては、最も減少していた5月の対前年比減少率は▲約23%にとどまっており、他の利用目的別交通量に比べ減少率が小さい。その後は下半期にかけて前年とほぼ同水準に回復しており、他の利用目的別交通量とは傾向が異なる。以上のことから、「業務」目的の交通量ではコロナ禍による影響が他の利用目的別交通量に比較して小さいことがわかる。

「生活」においては、2020年で交通量が最も少なかったのは4月であり、他の利用目的別交通量とは傾向が異なるところである。その交通量は、2020年4月で19,540台/日、2020年5月では20,120台/日であり、他の利用目的別交通量に比べて2020年4月と2020年5月の交通量の変動が小さい。このことから、コロナ禍であっても本四高速道路が通勤等による生活道路として、最低20,000台/日程度利用されていると考えられる。

「観光帰省」においては、5月の交通量の対前年比減少率は▲約75%と他の利用目的別交通量に比べ最も小さくなっており、緊急事態宣言発令下の外出自粛等の影響を大きく受けていることがわかる。その後も全国知事会によるお盆の帰省についての慎重な判断の呼びかけがなされた8月や、感染者数の再拡大に伴いGo To トラベルキャンペーンが全国一斉停止された12月に減少率が大き

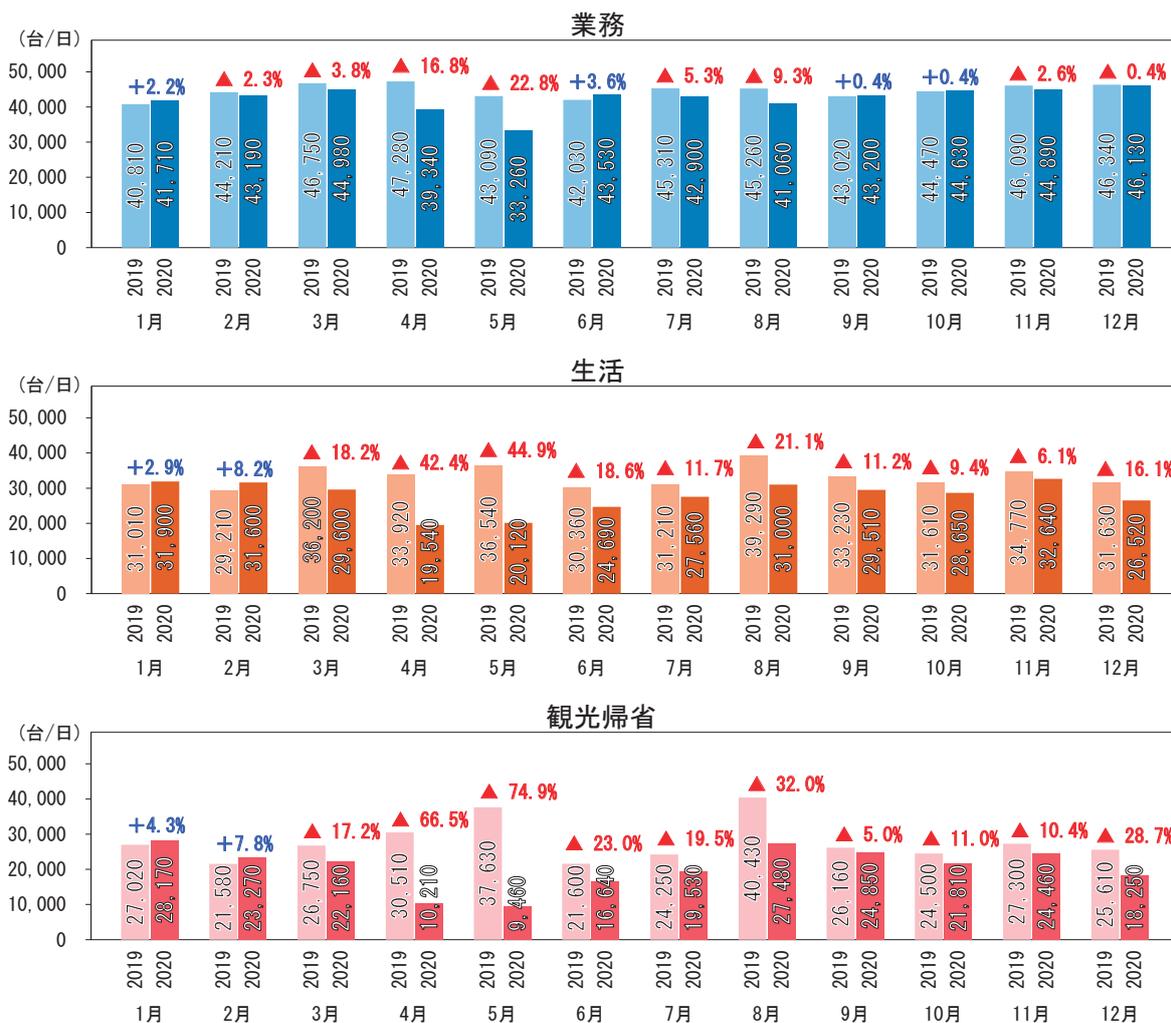


図-5 月別利用目的別交通量
Fig.5 Monthly traffic volume by purpose to use

くなっており、コロナ禍における世間の情勢の変化に影響を受けて推移している。

4.2 路線別利用目的交通量の傾向

コロナ禍による交通量の減少が確認された3月～12月を対象に、各路線別に利用目的別交通量を整理した。神戸淡路鳴門自動車道、瀬戸中央自動車道、西瀬戸自動車道の2019年、2020年の利用目的別交通量とその割合を図-6に示す。

各路線に共通して2019年、2020年それぞれで「業務」の占める割合が最も大きく、対前年比でも、他の利用目的別交通量に比べ減少率が小さい。特に瀬戸中央自動車道では、「業務」の占める割合は3路線のなかで最も大きく、対前年比では+約4%と増加している。このことから、瀬戸中央自動車道のコロナ禍による影響は、他の路線と比較して小さくなっている。

西瀬戸自動車道では、2019年、2020年ともに「生活」が4割以上を占めており、他の路線と比較して最も大きい。また、対前年比▲約18%と減少率では3路線のなかで最も小さい。以上のことから、西瀬戸道は通勤等の生

活道路として大きな役割を果たしていることがわかる。

神戸淡路鳴門自動車道では、「観光帰省」の占める割合が2019年、2020年ともに他の路線と比較して最も大きい。また、対前年比をみると▲約29%とコロナ禍による影響により大きく減少しているが、減少率は3路線のなかで最も小さい。この傾向についてより詳細に確認するために、本州、四国、淡路島の3つの発着地域別に分類し、それぞれの発着地域間の利用目的別交通量を整理した。結果を図-7に示す。本州四国間直通及び四国⇄淡路島間では、2020年の「観光帰省」の交通量は2019年に比べ▲約46%、▲約35%と大きく減少している。これに対し、本州⇄淡路島間での減少率は小さく、▲約7%にとどまっている。この要因として、緊急事態宣言発令下において県境を跨ぐ移動の自粛が呼びかけられており、近郊への観光需要の高まりが、淡路島への交通を底支えたものと考えられる。

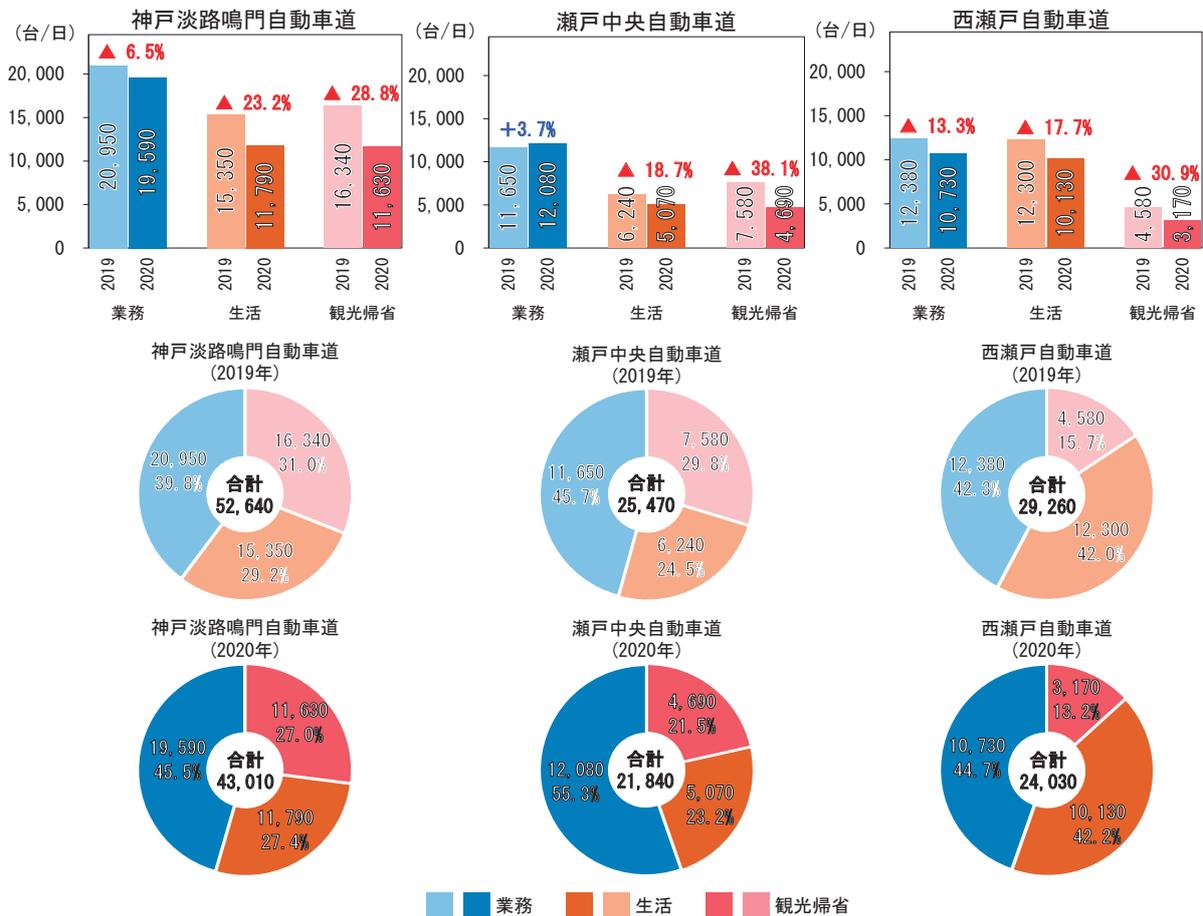


図-6 路線別利用目的別交通量 (3月~12月)
Fig.6 Traffic volume by purpose and using route (March-December)

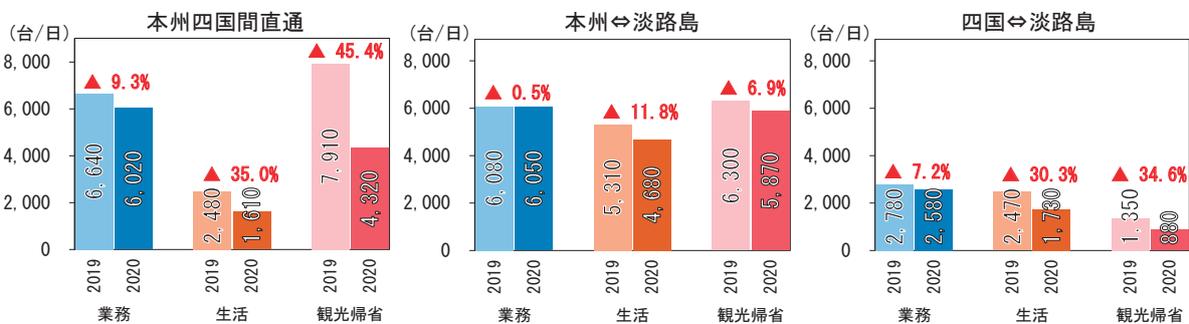


図-7 発着地域別利用目的別交通量 (神戸淡路鳴門道・3月~12月)
Fig.7 Traffic volume by purpose to use and areas of origin and destination (Kobe Awaji Naruto Expressway・March-December)

5. おわりに

コロナ禍における本四高速道路の利用状況を把握するため、車両の走行履歴を把握することが可能なETCデータを用いて本四高速道路を利用する車両を利用目的別に分類し、集計した。その結果、コロナ禍における利用目的別の交通量推移の傾向や本四高速道路各路線の利用目的傾向の特色について定量的に把握することができた。

また、コロナ禍における我々の生活様式は、コロナ禍以前と大きく変化しており、新しい生活様式として定着

しつつある。この新しい生活様式は、コロナ禍が終息した日常にも波及し、コロナ禍以前の生活様式へ完全には戻らないことが想定される。本検討では分析期間を2019年、2020年に限定して分析を実施したが、今後は、分析期間の拡充を図ることにより、本四高速道路のコロナ禍からの交通量の回復基調やコロナ禍前後での利用状況の変化について分析を実施し、その動向を注視していきたい。

本四高速グループの技術開発への取組

Efforts toward Technology Development

福永 勸 Susumu Fukunaga

長大橋・技術部長

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

長大橋・技術部次長

遠山 直樹 Naoki Toyama

長大橋・技術部
総括・耐震・耐風グループエキスパート

1. はじめに

鋼橋の当社が管理する海峡部長大橋は厳しい環境下に位置する大規模構造物である。200年以上の超長期にわたり、これら長大橋の健全性を確保していくためには、予防保全を基本とする維持管理を着実に実行していくことが重要である。同時に、劣化進行の予測精度を向上させて、適切な時期に効率的な修繕を計画的に実施し、ライフサイクルコスト（LCC）を最小にするという長大橋のアセットマネジメントを実現することも求められている。

このような取組において必要とされるさまざまな技術を効率的かつ効果的に開発していくために、技術開発に係る中期計画（技術開発計画）が策定され、同計画に基づき技術開発の進捗の管理、達成度の評価等が行われてきた。

これまでに行われた技術開発の成果については、過去の報告りで紹介されているが、最近の事例としては、省工程型塗料の開発、吊橋ケーブル送気乾燥システムの高度化、赤外線サーモグラフィを活用した点検手法の開発、鋼床版下面からの亀裂補修方法等に関する技術開発が行われている。

2. 技術開発項目

現行の技術開発計画（令和2～4年度）において、取組を行うこととされている技術開発項目を以下に示す。

2.1 防食

(1) 塗装（鋼）

- ・再塗替計画計画策定方法の提案
- ・補修塗装方法の効率化

(2) コンクリート保護工

- ・表面被覆材の付着性能評価と高性能化
- ・ASR対策表面保護材の性能確認

(3) 海中基礎防食

- ・海中構造物防食方法の確立

(4) ケーブル送気

- ・ケーブル気密化のためのラッピング法に応じた最適被覆法の確立

- ・効率的なシステムの構築と運転手法確立による LCC 最適化の実現

(5) ハンガーロープ、斜ケーブル

- ・ハンガーロープ管理要領の更新
- ・補修塗装仕様の提案
- ・斜張橋ケーブル腐食要因の特定と対応方針の提案

(6) 橋梁付属物

- ・鋼床版縦桁支承の延命化及び更新方法の提案

2.2 疲労

- ・鋼床版疲労点検の合理化検討
- ・赤外線サーモグラフィの疲労点検・評価への適用に関する検討
- ・疲労専門業務の効率的な実施

2.3 耐震

- ・海峡部長大橋の耐震補強設計
- ・陸上部橋梁の耐震補強設計

2.4 点検

- ・光学計測による部材表面の劣化評価に関する検討
- ・新たな点検手法の開発

次ページ以降に、昨年度に取組が行われた技術開発のうち、塗装（鋼）、ケーブル送気、疲労及び耐震に関する検討概要について報告する。

3. おわりに

なお、令和3年度に ICT 等最新技術を活用した高度化・効率化に取り組むため、高速道路事業高度化本部（以下「高度化本部」という。）が設置された。高度化本部における取組目標は「行動計画 2022-2024」にも反映され、特に、200年橋梁への挑戦としてロボット化、AI の活用等によるアセットマネジメントの高度化に取り組んでいくこととしている。これまで実施してきた前述の技術開発計画において継続して検討が必要なものについては、今後、高度化本部における保全業務高度化部会において引き続き実施していく予定である。

参考文献

- 1) 荻原勝也，山口和範，遠山直樹：技術開発計画（H29-R1）の成果，本四技報，Vol.45，No.135，pp2-12，2020.9

塗替塗装に関する検討

Study on repainting on steel structure

山根 彰 Akira Yamane

(株)ブリッジ・エンジニアリング
技術事業本部 技術第1課長

1. 検討目的及び経緯

塗替塗装を実施した橋梁では残存膜厚のばらつきが大きく、再塗替計画策定においては、これらのばらつきや塗膜消耗特性等について適切に評価を行う必要がある。

本稿は、令和3年度に実施した塗替塗装に関する技術開発の概要を報告するものである。

2. 省工程型塗料の開発

塗替塗装費の縮減及び環境負荷の低減が期待される省工程型塗料は、HBS塗料規格で屋外暴露耐候性を宮古島3年暴露後の光沢保持率が50%以上とされている。

この屋外暴露耐候性を満足し、かつ供給可能な省工程型塗料は1製品のみであったため平成31年から規格を満足することが期待される省工程型塗料の屋外暴露試験を宮古島で開始した。そして暴露期間3年が経過したことから光沢保持率の測定を実施した。

その結果、5塗料（4メーカー）で屋外暴露耐候性を満足することが確認された（図-1）。

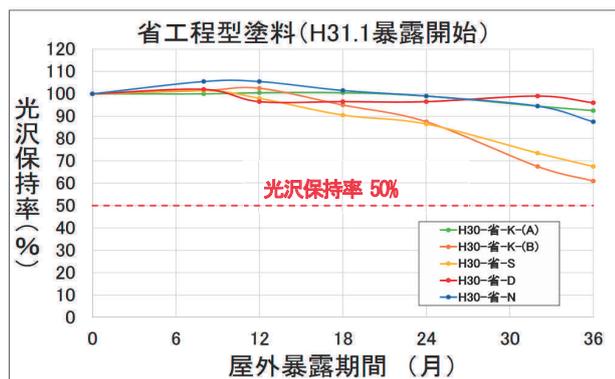


図-1 省工程型塗料の光沢保持率 (36ヵ月経過)

Fig.1 Rate of gloss retention of simplified application process paint

3. 塗替塗装した橋梁の残存膜厚調査

1回目の塗替塗装が施工済みである大三島橋で残存膜厚の調査を実施した。調査箇所は、アーチリブ・床組等とし、約300点で測定を行った。その結果、無機ジンク

層を除いた残存膜厚は平均で約360 μ m、最大で約620 μ mと比較的厚い塗膜が残っていた（表-1）。

大三島橋の建設時に適用された塗装系には、塩化ゴム・フェノールMIO等が含まれており他の本四連絡橋との比較は難しいものの残存膜厚が厚いことから塗膜消耗による塗膜寿命は比較的長期になるものと推定される。

表-1 大三島橋残存膜厚調査結果（無機ジンク層は除く）

Table 1 Residual coating thickness of Ohmishima Bridge

	アーチリブ	支柱	タイ	床組	全データ
データ数	52	12	52	192	308
最大値	623 μ m	439 μ m	596 μ m	524 μ m	623 μ m
最小値	207 μ m	285 μ m	239 μ m	197 μ m	197 μ m
平均値	338.1 μ m	362.6 μ m	410.3 μ m	351.4 μ m	359.6 μ m
標準偏差	75.4 μ m	51.5 μ m	80.6 μ m	63.6 μ m	72.1 μ m

4. 上塗り塗料の消耗速度調査

塗膜の劣化予測計算を行うためには、各塗膜の残存膜厚と塗膜消耗速度の平均値及び標準偏差が必要となる。

令和3年度は多々羅大橋及び来島海峡大橋でふっ素樹脂塗料の消耗量調査を行い、表-2の結果が得られた。

この調査結果は、令和2年度に明石海峡大橋で得られた塗膜消耗速度（平均値；0.36 μ m/年）と比べて小さな値となった。

表-2 塗膜消耗速度調査結果（ふっ素樹脂塗料）

Table 2 Reduction rate of coating thickness

橋梁名	上塗り塗料	調査部位	調査時期	塗膜消耗速度		
				測定サンプル数	平均値 (μ m/年)	標準偏差 (μ m/年)
多々羅大橋	ふっ素樹脂塗料	フェアリング(外面)主桁(下面)	2021年(8.3年目)	30	0.24	0.09
来島海峡第三大橋		フェアリング(外面)主桁(下面)	2021年(8.3年目)	30	0.24	0.17

5. まとめ

引き続き、長大橋の塗替塗装に関する検討として上塗り塗膜の消耗特性調査、塗膜消耗以外の劣化要因調査、素地調整方法の調査等を実施する予定である。

ケーブル送気乾燥システムに関する検討

Study on cable dehumidification system

平松 直人 Naoto Hiramatsu

長大橋・技術部
技術革新・アセットマネジメントグループ

山根 彰 Akira Yamane

(株)ブリッジ・エンジニアリング
技術事業本部 技術第1課長

1. ケーブル気密化のための補修仕様の検討

1.1 塗替塗装仕様の性能確認

送気乾燥システムを導入した吊橋の主ケーブルでは、柔軟型エポキシ樹脂塗料（中塗り2層）により気密化を図っているが、一部の吊橋では塗膜にひび割れが発生している。そのため、伸び性能に優れた新たな塗替塗装仕様を選定して暴露試験や試験施工箇所の継続調査を行っている。

令和3年度は、大島大橋において試験施工された塗替塗装仕様（表-1）の継続調査（約8年後）を行った。

表-1 主ケーブル塗替塗装仕様

Table 1 Specifications of repainting (main cable)

橋梁名	仕様	中塗り塗料	中塗り層数	上塗り塗料
大島大橋	I	柔軟型エポキシ樹脂塗料	4層塗り	柔軟型ふっ素樹脂塗料
	II		3層塗り	
	III	アクリルゴム系塗料	3層塗り	アクリルシリコン
			IV	

調査は、夏季と冬季の2回とし主ケーブルの上面は近接目視、下面は双眼鏡を使った遠方目視で行った。

調査の結果、仕様Ⅰ・Ⅱは、白亜化の進展が見られたが塗膜割れ・送気漏れは無かった。仕様Ⅲ・Ⅳでは、送気漏れの発生は無かったが、白亜化の進展と上塗り塗膜内で発生する微細なひび割れの増加が見られた。この微細なひび割れは点検・作業に伴う人の歩行等によって発生したものと考えられる。

1.2 ゴムラッピング補修仕様の性能確認

ゴムラッピングにより気密化を図っている主ケーブルを対象として、ゴムラッピング補修の試験施工が行われており、施工後の経年変化を調査している。

令和3年度は、明石海峡大橋で試験施工されたゴムラッピング補修仕様（図-1）について3年経過後の調査を行った。

調査の結果、ゴムの膨れ・送気漏れ・塗膜のはがれ等は無く、ゴムの加硫が進み安定した状態となったものと考えられる。

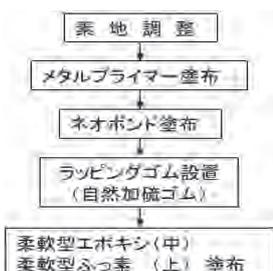


図-1 ゴムラッピング補修仕様
Fig.1 Repair specifications

2. ケーブル送気乾燥システムの効率的な運用に関する検討

送気乾燥システムを導入している明石海峡大橋の主ケーブル内部の腐食環境を把握するため、電気抵抗式腐食センサー（以下「RCMセンサー」という。）を用いた測定を試行的に行った。RCMセンサーは樹脂で防食された健全な金属部と、腐食により減肉した金属部の電気抵抗値を測定することで、設置個所の腐食環境を定量的に把握できるものである。令和元年度にRCMセンサーを塔頂サドル気密幕内に設置し、29か月後の変化を確認した。測定期間中に送気乾燥システムを停止する期間があり、RCMセンサーに小さな点さび（写真-1）が発生したものの、電気抵抗値の変化は確認できなかった。一方、比較のために屋外環境に設置したRCMセンサーでは、金属部の腐食が進行し電気抵抗値が大幅に低下することが確認された。以上よりRCMセンサーを用いた腐食環境の把握手法は、屋外などの厳しい腐食環境下では評価可能であるが、送気乾燥システム導入済の吊橋ケーブルでの一時的な環境変化における評価には課題があると考えられる。



写真-1 RCMセンサーの経年変化

Photo 1 Secular change of RCM sensor

3. まとめ

主ケーブル塗替塗装仕様及びゴムラッピング補修仕様の施工後の経過観察を継続するとともに、温湿度自動計測システムの導入と、自動計測された情報の活用に向けた検討を進めていく予定である。

赤外線サーモグラフィの疲労点検・評価への適用

Study on the Advancement of Fatigue Inspection and Evaluation Using Infrared Thermography

杉山 剛史 Takeshi Sugiyama

長大橋・技術部
技術革新・アセットマネジメントグループ
リーダー

有馬 敬育 Noriyasu Arima

経営計画部経営計画課エキスパート
(前)長大橋・技術部
技術革新・アセットマネジメントグループ
エキスパート

平松 直人 Naoto Hiramatsu

長大橋・技術部
技術革新・アセットマネジメントグループ

1. はじめに

鋼橋の疲労損傷は、通行車両等による応力の繰返しが原因で発生する損傷である。本四連絡橋において発生が確認あるいは懸念される疲労損傷に対して、できるだけ効率的かつ高精度に疲労損傷を検出するとともに、効率的に補修できるよう、新技術の開発・活用検討を実施している。

2. 鋼床版疲労点検の合理化検討

2.1 経緯

都市高速道路の重交通路線などの橋梁において、車両通行時の繰返し荷重による、いくつかのタイプの疲労亀裂が見つまっている。このうち、鋼床版における輪荷重直下のデッキプレート（以下「デッキ」という。）とUリブ溶接部のルート部から発生、ビード内を進展し、ビードを貫通する亀裂（以下「ビード貫通亀裂」という。）（図-1）は多く発見されている。本四連絡橋においても、これまでに一部の橋梁においてビード貫通亀裂が確認されている。今後、供用年数の増に伴って新たな亀裂の発生も懸念されることから、点検により疲労亀裂を確実に検出し、適切に対処することが必要である。このため、この亀裂を、低コストかつ効率的に検出できる非破壊検査法として、亀裂の断熱効果により生じる温度差（温度ギャップ）を赤外線サーモグラフィを用いて検知することで、亀裂を検出する“温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法”（以下「温度ギャップ法」という。）を神戸大学との共同研究において開発、点検シス

テムを実用化している^{1) 2)}。

本四連絡橋は多数の鋼床版を有していることから、設計年度や構造ディテール、累積交通量などを考慮して点検対象箇所を選定し、開発した点検システムを用いて点検を計画的に行っている。令和3年度は、瀬戸大橋及び大鳴門橋で疲労点検を実施した。

2.2 鋼床版疲労基礎点検結果

瀬戸大橋においては、平成27年度に点検に着手しており、令和3年度は櫃石島高架橋トラス部、与島橋、番の州高架橋トラス部を実施した。これにより調査対象全パネルの一巡目の点検が完了したが、ビード貫通亀裂は検出されていない。このことも考慮し、今回点検着手より10年後の令和7年度頃から次回点検に着手予定である。

大鳴門橋では令和元年度に点検に着手し、令和10年度に完了する計画で進めている。令和3年度は中央径間部（20パネル）について実施した。現時点においてビード貫通亀裂は検出されていない。引続き点検を進めていく予定である。

2.3 一般橋梁への適用拡大

これまで、瀬戸大橋、門崎高架橋、大鳴門橋において温度ギャップ法を用いた点検を進めてきた。今後は、これら以外の橋梁においても、明石海峡大橋以降に鋼床版の設計で反映された構造ディテールが適用されておらず、累積大型車交通量が多い橋梁を対象に、温度ギャップ法を用いた点検を行う予定である。

これまで温度ギャップ法による点検を実施してきた橋梁では、点検作業車や管理路を利用して、撮影装置を溶接線に対して平行移動させることで溶接部の連続画像を取得してきた（写真-1）。しかし、点検対象とする溶接線が撮影できる位置に点検作業車や管理路がない場合や、撮影装置の移動の障害が多い箱桁内では、これまでの撮影方法をそのまま適用できない。このため、これらの橋梁においても、それぞれの現場の条件に応じて調査対象溶接線を効率的に点検できる手法の検討を進めていく予定である。

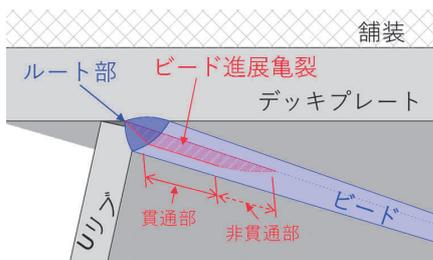


図-1 ビード貫通亀裂
Fig.1 Bead-penetrating crack



写真-1 瀬戸大橋における点検状況（レール方式）

Photo 1 Inspection at Seto-Ohashi Bridge(Rail method)



写真-2 岩黒島橋における熱弾性応力測定

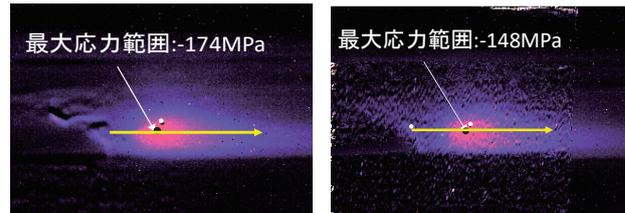
Photo 2 Thermoelastic stress measurement at Iwakurojima Bridge

3. 赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力測定法の高度化

鋼橋に生じた疲労亀裂の進展性評価や補修効果の検証を行うためには、亀裂周辺の発生応力を適切に評価する必要がある。特に亀裂先端周辺の応力状態は、亀裂の進展性に大きく影響するため、重要な情報となる。このため、神戸大学との共同研究により、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力測定法による疲労亀裂進展推定法の開発について取組んでいる。

亀裂進展評価のためには亀裂先端の小領域の温度変化を測定する必要があるが、供用下の橋梁で赤外線画像の撮影を行う場合、交通振動により部材と撮影器具が別々に揺れ、画像にぶれが生じるため正確な計測が難しい。このため、赤外線カメラに光学カメラを組み合わせた計測システムにより、赤外線画像のぶれを補正することで交通振動の影響を減少させることを試みた（写真-2）。

測定対象は、岩黒島橋K24（上り線G2桁）の鋼床版支承部における縦桁交差部の垂直補剛材溶接部に発生している疲労亀裂を対象とし、荷重車走行時の変動応力を測定した。測定箇所上を荷重車が通過する際に生じた亀裂先端近傍の応力範囲が最大値となる時の赤外線画像（自己相関ロックイン処理結果）を図-2に、その時の応力範囲プロファイル画像補正の有無で比較したものを図-3に示す。このグラフは、図-2の赤外線画像上で応力範囲が最大値を取る画素を通る水平方向の矢印上の応力範囲のプロファイルを示している。図-3から、位置補正の有無により違いが生じていることが確認できる。補正なしの場合、対象物の振動による撮影画像のぶれにより着目する測定点が連続画像内で移動するため、同一画素における温度変化は、部材測定点本来の温度変化ではないことから計測精度が悪くなっており、画像補正を行うことで、見かけの温度変動が除去されたと考えられる。供用中の橋梁において赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定を行う際には、今回実施した計測システムにより画像補正を行うことで、高精度に亀裂先端近傍の応力場を計測することが可能と考えられる。



(a) 画像補正なし (b) 画像補正あり

図-2 自己相関ロックイン画像

Fig.2 Image of self-reference lock-in processing

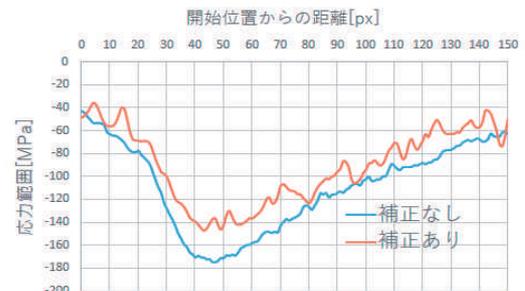


図-3 亀裂先端近傍の応力範囲プロファイル

Fig.3 Stress range profile with and without image correction

4. まとめ

本四連絡橋は、直轄の重交通路線や都市高速等と比べて疲労環境が厳しくないため、一部の橋梁に疲労亀裂が確認されている程度である。しかし、疲労亀裂は、大型車荷重等による繰返し荷重の累積により発生する損傷であり、発生した亀裂が進展して橋梁の耐荷力に影響を及ぼす場合もあることや、補修の難易度が高くなることから、早期発見及び補修が極めて重要であり、今後も鋼橋の疲労に係る点検・補修技術の開発を進める必要がある。

参考文献

- 1) 溝上善昭, 小林義弘, 和泉遊以, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版デッキプレート-Uリブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出, 鋼構造論文集, 第22号第87号, pp.47-56, 2015.9
- 2) 溝上善昭, 奥村淳弘, 大藤時秀, 和泉遊以, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ法によるUリブ鋼床板のビード貫通亀裂の自動検出と装置開発, 構造工学論文集, Vol.64A, pp.573-582, 2018.

耐震に関する取組

Efforts toward seismic safety

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

長大橋・技術部
次長 兼 総括・耐震・耐風グループリーダー

金田 崇男 Takao Kaneda

長大橋・技術部
総括・耐震・耐風グループサブリーダー

1. 検討目的及び経緯

耐震に関する取組のうち、耐震補強については、長大橋・技術部を中心に、保全部、管理センターが一体となり、橋梁の耐震性能照査、耐震補強設計、施工計画の立案等を実施している。

代替路のない海峡部近辺IC間の耐震補強については、明石海峡大橋区間及び大鳴門橋区間を平成28年度に、瀬戸大橋区間を令和2年度に完了している。現在は、平成25年度から着手した西瀬戸自動車の長大橋耐震検討を進めており、令和3年度は因島大橋の耐震補強設計が完了し、来島海峡大橋の耐震性能照査・補強設計に着手した。

陸上部橋梁の耐震補強については、令和8年度末までに耐震補強が必要な橋梁を対象とした耐震補強設計に着手しており、令和3年度は対象橋梁の多い神戸管理センター管内のほか、鳴門管理センター管内の橋梁について、耐震性能照査・補強設計を実施した。

また、耐震に関する新たな取組として、地震後の長大橋の安全性評価手法の高度化を目指し、(公財)鉄道総合技術研究所(以下「鉄道総研」という。)と「長大橋りょうの地震時挙動即時推定に関する研究」と題した共同研究(令和2年10月～令和4年3月)を行った。令和3年度は、櫃石島橋を対象に検討を行い、長大斜張橋の地震時被害即時推定手法の開発を行った。

本報では、令和3年度に耐震補強設計がおおむね完了した神戸管理センター管内にある路谷上池橋の耐震性能照査、補強設計の検討概要と、鉄道総研との共同研究の取組を紹介する。

2. 路谷上池橋の耐震補強設計

2.1 橋梁概要

路谷上池橋は神戸淡路鳴門自動車の東浦ICと北淡ICの間に架かる橋長109m、アーチ支間長83mの鋼製上落式ローゼ橋で、平成9年から供用している。適用基準は平成6年道路橋示方書であり、レベル2地震動で設計されていない。橋梁概要等を写真-1、表-1、図-1に示す。



写真-1 路谷上池橋

Photo 1 Rotanikamiike Bridge

表-1 橋梁概要

Table 1 Outline of bridge

橋梁名	路谷上池橋
橋梁形式	鋼上落式ローゼ橋
橋長	109.0m [上下線]
支間割	12.5m+83.0m+12.5m [上下線]
有効幅員	10.250m
床版形式	RC床版
基礎形式	直接基礎
支承	アーチ基部：ピン支承(固定) 橋台部：BP支承(可動)
適用設計基準	道路橋示方書(平成6年)

2.2 耐震性能照査

耐震性能照査は、平成24年道路橋示方書に規定されるレベル2地震動を用い、補剛桁、アーチリブなどの鋼部材、床版及び橋台を線形はり要素、支承及び基礎構造一地盤系を線形ばね要素でモデル化した3次元モデルとし地震応答解析を行った。

耐震性能照査の結果、ほぼ全ての部材で損傷が想定されることがわかった。特に、補剛桁、アーチリブ、鉛直材などは、おおむね全断面で照査を満足せず、支承部については、アーチ基部支承と橋台部支承の両方で、最大で支承耐力の10倍程度と非常に大きな断面力が発生する結果となった。耐震性能照査結果の代表例として、補剛桁、アーチリブ、支柱の損傷想定箇所を図-1に示す。

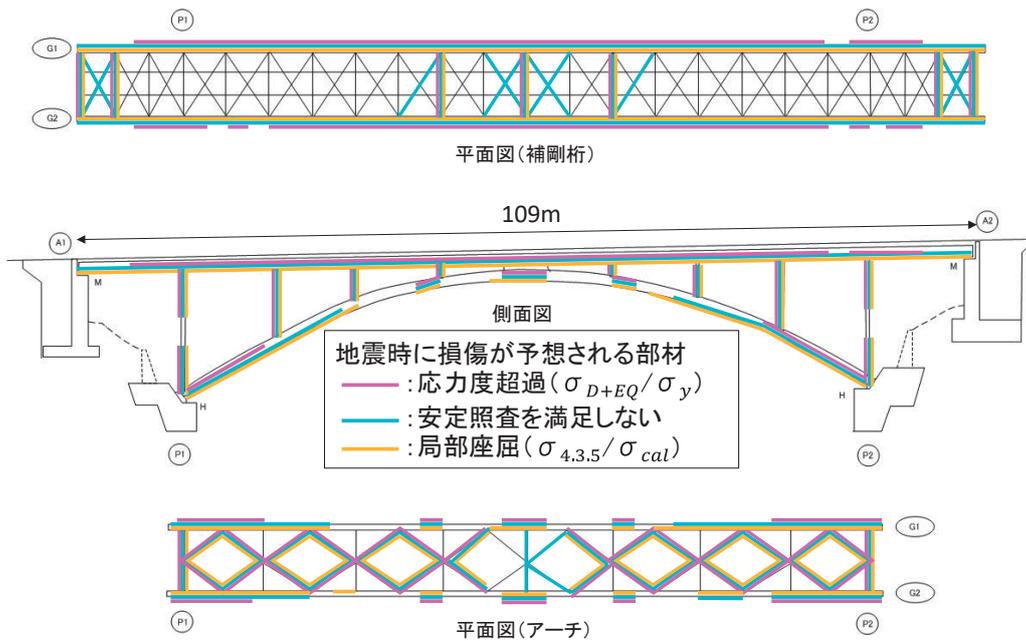


図-1 桁・アーチ・支柱の耐震性能照査結果（上り線）

Fig.1 Results of seismic performance verification in girder, arch and support members (up line)

2.3 耐震補強設計

ほぼ全部材の損傷が想定される照査結果及び特殊な橋梁形式であること等を踏まえ、耐震補強設計の方針については、地震時の応答を弾性範囲に留めることにより耐震性能2を満足させることとした。

補強対策の検討は、橋の代表部である補剛桁、アーチリブ、支柱、アーチ基部支承、橋台部支承に着目し、橋梁全体系の応答低減を図ることができる表-2に示す5つの工法を選定し、各工法における応答低減効果を評価し、補強工法案を決定することとした。

表-2 耐震補強工法

Table 2 Method of seismic retrofit

工法1： アーチ基部 支柱の固定化	コンクリート巻立てによりアーチ基部支柱を固定化し、上揚力対策を行う案
工法2： アーチクラウン部の一体化	アーチクラウンとその隣接した支柱を一体化し、アーチクラウン部の剛性増による全体的な変形抑制及び断面力低減を図る案
工法3： 対傾構設置	支柱に座屈拘束ブレースを対傾構として設置し、橋軸直角方向の変形抑制及び断面力低減を図る案
工法4： 下横構交換	アーチリブの下横構を座屈拘束ブレースに交換し、橋軸直角方向の応答低減を図る案
工法5： 粘性ダンパー設置	橋台位置に粘性ダンパーを設置し、エネルギー吸収により橋軸方向の応答低減を図る案

検討の結果、アーチクラウン部の一体化（工法2）については、期待した応答低減効果が得られなかったが、その他の4つの工法については、それぞれ橋梁に一定の応答低減の効果が確認された。

これらの工法のうち、直接補強や取替えなどの別の工法が困難なアーチ基部支承部については、工法1に示す固定化による対策を必須とした。そのうえで、補強効果が確認できた工法3～5に当て板補強案を組合せ、構造的・経済的・施工性・維持管理性の観点で比較検討を行った。

以上の検討を踏まえ、アーチ基部支承部の固定化（工法1）、対傾構設置（工法3）、下横構交換（工法4）、粘性ダンパー設置（工法5）、当て板補強の組合せが最適であることが確認できた。

上記の最適案に対する照査の結果、橋台部支承については、橋軸直角方向の反力及び上揚力が支承耐力を超過するため、支承補完構造を設置する案とした。なお、ダンパー設置に伴い、堅壁基部の地震時保有水平耐力及び残留変位の照査を満足しないことから、ダンパーの水平力に抵抗するため、グラウンドアンカーの設置が必要となった。

なお、アーチ基部支承の固定化に伴う支持条件の変更に対して、レベル2地震動以外の荷重組合せに対する照査を実施している。

以上において、路谷上池橋の耐震性能照査、補強設計について検討概要を紹介した。紙面の都合で補強図は割愛したが、レベル2地震動に対して設計されていない橋梁であり、ほぼ全部材、全断面に対する補強が必要となった。

3. 長大橋の地震時被害即時推定手法の開発

3.1 検討概要

本四連絡橋を対象とした地震後の健全度評価については、主要な長大橋に設置された動態観測システムから得られた観測データと、全長大橋分が整備されている線形骨組解析モデルを用いた構造解析による応答値の算出と、地震動の加速度応答スペクトルの算出により確認する体制が構築されている。しかし、観測位置が限られていることや、地震後の即時推定が難しいなどの課題がある。

こうした地震後の健全度評価手法の1つとして、鉄道総研が開発し令和元年から運用が開始された、鉄道構造物を対象とした地震後の即時被害推定を目的としたシステム（鉄道地震被害推定情報配信システム）がある¹⁾。

本システムは、緊急地震速報（気象庁）及びK-NET（防災科学技術研究所）の地震データを用いて、沿線の揺れの分布や一般的な鉄道構造物の被害の分布などを速やかに推定し提供するものである。ただし、一般的な鉄道構造物を対象とした手法であり、長大橋のような複雑な構造物には現状では適用できない。こうした背景の中、長大橋における地震後の即時被害推定手法の構築を目的とし、鉄道総研と本四高速で共同研究を行うこととした。

本報では、長大斜張橋である櫃石島橋の鉄道縦桁支承部に着目して行った検討のうち、提案手法の有効性検証結果について概説する。なお、提案手法の詳細については、文献2)を参照されたい。

3.2 提案手法の概要

(1) 使用する情報

提案手法は、モード解析の考え方を応用し、モード解析と同等の最大値評価を行える方法である。特徴としては、地震発生直後には地震動波形が入手できない可能性があるとともに、波形を使用した評価を行うと処理に時間を要するため、代わりに限られた情報（地震動の最大加速度PGAや最大速度PGV）を使用する点である。ここで、モード解析による構造物の時刻歴挙動評価では、構造物情報として構造物の振動特性である固有値解析結果、地震動情報として入力地震動（加速度波形）を用いて、構造物の時刻歴応答波形を評価する。

これに対して、提案手法では必要な構造物情報はモード解析による方法と同じであるが、地震動情報として地表面位置での地震動の最大加速度（PGA）及び最大速度（PGV）を用い、構造物の最大応答値を評価する。

なお、必要な構造物情報は、事前に算定可能な刺激関数、固有周期及びモード減衰比である。

提案手法では、振動モードのうち刺激関数の絶対値が閾値よりも大きいものを等価1自由モデルで表現し、これと別に求める被害推定ノモグラム³⁾を組み合わせることで各等価1自由度モデルの最大応答値を推定する。そして、これらの最大応答値を重ね合わせることで、構造

物の最大応答値を推定する。

(2) 最大応答値の推定手順

着目部位である鉄道縦桁における絶対加速度応答の最大値（評価対象位置及び方向に応じたスカラー）を推定し、推定した絶対加速度応答の最大値に支持荷重を乗じて、鉄道縦桁支承部に作用する慣性力を求め、支承部材の限界値と比較することで損傷状態を把握する。

提案手法では、連立一次方程式の求解等は必要としない閉形式を採用しているため、即時的な評価が可能となっている。

3.3 提案手法の有効性検証

(1) 対象とする構造物

提案手法の有効性検証は、道鉄併用斜張橋（図-2）を対象に行った。振動モードに関する情報は、本橋の耐震検討で用いた非構造部材（管理路等）以外を全てモデル化した詳細なモデルによる固有値解析から評価した。対象橋梁の具体的な諸元や詳細なモデル化方法等については、文献4)を参照されたい。

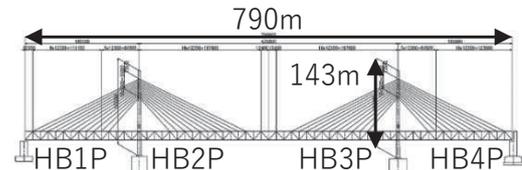


図-2 橋梁一般図（櫃石島橋）

Fig.2 General view of Hitsuishijima Bridge

(2) 複数の地震動による検証

複数の地震動に対して、特定の鉄道縦桁における加速度を評価した際の提案手法の有効性を検証する。使用する地震動は文献3)と同様である。理想的には、詳細なモデルによる非線形動的解析（以下「詳細解析」という。）の結果との比較による検証が望ましいが、複数の地震動に対して実施するには膨大な時間を要する。そこで、短時間で実施可能な詳細なモデルによるモード解析法の結果との比較を行った。なお、詳細解析とモード解析法の結果が大きく乖離していないことは確認している。

検証では、橋梁中心位置を対象とし、線路直角方向に地震動を与えた際の同方向の鉄道縦桁（図-3）の最大加速度を評価する。なお、提案手法における刺激関数の閾値は0.1とする。比較結果を図-4に示す。モード解析法に対する提案手法のRMSPE（平均二乗パーセント誤差の平方根）は0.34であり、全線の被害の俯瞰的な把握という観点で実用に足る精度が確保できているといえる。

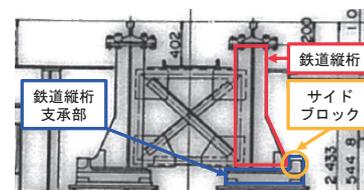


図-3 鉄道縦桁支承部

Fig.3 Railroad track girder supports

(3) 複数の支承部を対象とした検証

(2)では様々な地震動に対して提案手法が有効なことを示した。(3)では特定の地震動を用いて、提案手法により実際に長大橋の全線の被害推定が可能であることを示す。使用する地震動は1つのみであり計算時間は問題とならないため、比較には詳細解析を用いる。

詳細解析では橋脚位置に応じて地震動（水平と鉛直方向）を与えるが、提案手法では各橋脚位置の地震動（水平方向のみ）を平均化した波形からPGAとPGVを読み取る。検証では、全線の鉄道縦桁支承部を対象とし、水平方向を線路直角方向として伏在逆断層による地震動（図-5）を与えた際の、同方向のサイドブロックの水平力に関する照査値（応答値/限界値）を評価する。なお、詳細解析では支承ばね要素から直接的に水平反力を算定するが、提案手法では鉄道縦桁位置の加速度に支持荷重を乗じて水平反力を算定する。また、提案手法における刺激関数の閾値は0.01とする。比較結果を図-6に示す（支承番号は起点側から昇順）。端部における結果が若干乖離しているが、全線にわたる傾向はおおむね一致していることから、提案手法を全線の被害の俯瞰的な把握に活用できることが示された。

4. まとめ

橋梁の耐震補強のうち、海峡部長大橋は残すところ来島海峡大橋のみとなっており、令和5年度に耐震補強設計を完了する計画である。また、陸上部橋梁については、令和4年度に発生確率26%未満の地域にある神戸、鳴門、岡山、尾道の各管理センター管内の橋梁の耐震補強設計を進める予定である。引き続き、これまで蓄積してきた知見を生かし、合理的な耐震補強設計を行うと共に、着実な耐震補強の進捗を図る予定である。

また、長大斜張橋を対象に地震時被害即時推定手法を検討し、提案手法により地震発生直後の長大橋全線の被害を俯瞰的に把握することが可能であることが示された。令和4年度も、鉄道総研との共同研究により、他部材や吊橋やトラス橋など他形式の長大橋においても同様の評価が可能であることを検証するとともに、地震後の長大橋の健全度評価手法の高度化に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 岩田ら：鉄道地震被害推定情報配信システム（DISER）を利用して素早く運転を再開する，RRR, Vol.77, No.2, pp.12-15, 2020
- 2) 月岡ら：長大橋りょうの地震時被害即時推定手法の開発，土木学会第77回年次学術講演会（投稿中），2022.
- 3) 坂井ら：地震動の最大加速度と最大速度を用いた土木構造物の地震被害推定ノモグラムの改良，土木学会論文集A1（構造・地震工学），Vol.71, No.4, pp. I-32-I-39, 2015.
- 4) 西谷ら：瀬戸大橋斜張橋（櫃石島橋、岩黒島橋）の耐震補強設計，本四技報，Vol.42, No.130, pp.52-58, 2018.3

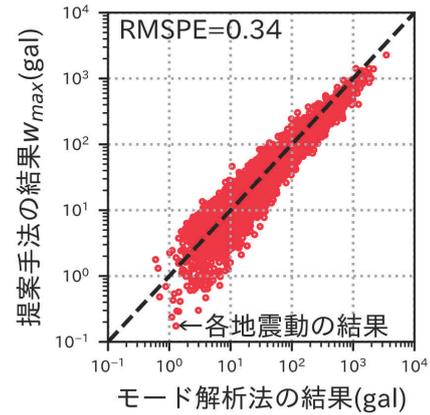


図-4 提案手法とモード解析法の比較

Fig.4 Comparison of proposed method and modal analysis method

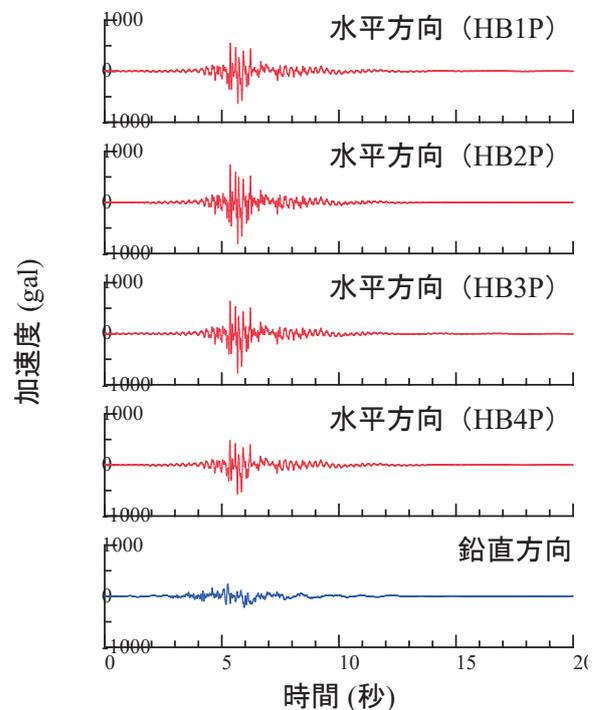


図-5 伏在逆断層による地震動

Fig.5 Ground motion of concealed reverse faults

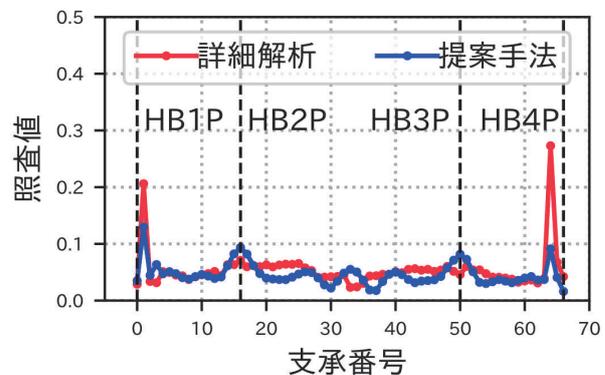


図-6 提案手法と詳細解析の比較

Fig.6 Comparison of proposed method and detailed analysis

ゆめしま海道「岩城橋」が開通

Opening of Iwagi Bridge (Yumeshima Kaido)

この度、ゆめしま海道の「岩城橋」が令和4年3月20日に開通し、全線供用（延長 6.1km）となりました。

（写真-1、2）

岩城橋は、愛媛県越智郡上島町の岩城島と生名島を結ぶ海上橋で、上島架橋事業（3橋）の最後の1橋として、工事が進められていました。本橋は、本体橋と取付高架橋で構成され、橋長は916mです。このうち本体橋は、橋長735m（中央径間長475m）の5径間連続鋼・コンクリート混合斜張橋です。（図-1、2）

本体橋の主な特徴は、(1)主塔は高さ130mを超えるRC構造の直接基礎、(2)接合部は中央径間側（62m）に張り出した位置、(3)PC桁（張出式2室1箱桁）は片持ち架設と固定支保工で施工、(4)斜材は現場収束型（PE保護管先行方式）ストランド、(5)鋼桁（1室1箱桁）はFC船及び橋上クレーンによる片持ち架設、(6)鋼桁外面はAl-Mg金属溶射等です。

本体橋の上部工は、中央径間中央を境に岩城島側と生名島側の2工区で、平成29年7月の起工式から本格的な工事が進められました。主塔の施工から始まり、PC桁の施工、改造ワーゲンによる台船上からの接合桁架設、FC船での第一鋼桁ブロックと橋上クレーン（EN：エレクションノーズ）の架設の後に、当該ENによる本格的な海上工事（鋼桁9×2工区分）を行いました。なお、当初は、生名島側が先行していましたが、海上工事の終盤には追い上げ、岩城島側において閉合桁を令和3年6月に架設しました。その後は、閉合作業、斜材の張力調整、橋面工事などを経て、本体橋の工事は令和4年1月末に完了しました。

本橋の開通により、地域間連携の強化や緊急輸送道路としての役割を担うと共に、観光面での集客効果も期待されています。

【謝辞】愛媛県より資料提供して頂きました。

（「岩城橋工事監理支援業務（H29.7～R4.2）」現場担当技術者：しまなみ今治管理センター 計画グループ エキスパート 木村一也）



写真-1 岩城橋の開通式



写真-2 完成した岩城橋（岩城島側から）



図-1 ゆめしま海道（岩城橋）位置図

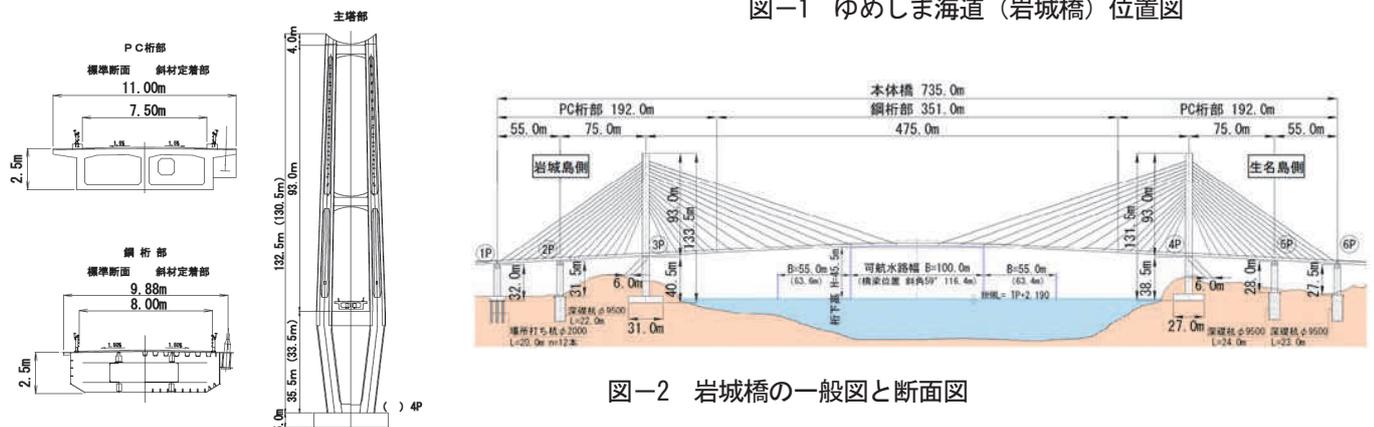


図-2 岩城橋の一般図と断面図

文 献 紹 介

本州四国連絡橋関連技術文献紹介 (21.08~22.04)

題 名	著 者	雑誌名等	巻	号	年月	頁
神戸淡路鳴門地域等周遊観光の取組みについて	白井武	交通工学Vol. 55 No. 3	55	3	202007	4
省工程型ふっ素樹脂塗料規格の制定	竹口昌弘 山根彰	高速道路と自動車 第64巻 第2号	64	2	202102	4
グースアスファルト舗装局部補修の推奨仕様	中山義雄 梶尾光邦	高速道路と自動車 第64巻 第3号	64	3	202103	5
長大橋主塔点検ロボットの開発-主塔点検ロボット基本性能と点検実施結果-	山下洋	検査技術Vol. 26No. 4	26	4	202104	6
大鳴門橋補剛桁アプローチ率向上に向けた桁作業車改造の取組	西山貴偉 清原一宏 松葉真人	高速道路と自動車 第64巻 第4号	64	4	202104	4
瀬戸大橋とともに「瀬戸大橋記念館」-英知を結集した日本の20世紀遺産「瀬戸大橋」-	河合宏昭	土木技術76巻07号	76	7	202107	5
本四連絡橋における基礎工法 - 設置ケーソン工法 -	福永勲	土木施工	62	8	202108	4
温度ギャップ法による非貫通亀裂の形状評価に関する研究	佐賀亮太 和泉遊以 阪上隆英 有馬敬育 西谷雅弘 内野隆太郎	土木学会全国大会 第76回年次学術講演会			202109	2
アクティブ近赤外線ロックイン計測による防食塗装膜の劣化評価法の開発	坂田巧 塩澤大輝 有馬敬育 阪上隆英 内野隆太郎 西谷雅弘 岸上俊介 春日裕樹	土木学会全国大会 第76回年次学術講演会			202109	2
アクティブ近赤外線ロックイン計測による本州四国連絡橋の防食塗装膜の劣化評価	有馬敬育 内野隆太郎 阪上隆英 塩澤大輝 西谷雅弘 岸上俊介 春日裕貴 坂田巧	土木学会全国大会 第76回年次学術講演会			202109	2
ケーブル部材の状態が長大吊橋の構造安全性に及ぼす影響検討	金田崇男 山口和範 有馬敬育	土木学会全国大会 第76回年次学術講演会			202109	2
ケーブル部材の状態が長大斜張橋の構造安全性に及ぼす影響検討	永瀬繁幸 金田崇男 山口和範 有馬敬育	土木学会全国大会 第76回年次学術講演会			202109	2
大三島橋の耐震補強設計	山口和範 金田崇男 永瀬繁幸	土木学会全国大会 第76回年次学術講演会			202109	2
西瀬戸自動車道の高盛土の補強対策工	稲垣孝一 寺嶋賢策 北村岳伸 信重和紀	土木学会全国大会 第76回年次学術講演会			202109	2
瀬戸大橋における無機ジンクリッチペイント凝集破壊の補修状況と原因推定	山根彰 竹口昌弘 大賀弘貴	土木学会全国大会 第76回年次学術講演会			202109	2

題 名	著 者	雑誌名等	卷	号	年月	頁
大鳴門橋桁外面作業車伸縮ブーム接触防止装置の 開発	清原一宏 松尾俊宏 松葉真 人	土木学会全国大会 第76回年次学術講演 会			202109	2
西瀬戸自動車道のボックスカルバートの補修方法 検討について	信重和紀 寺嶋賢策 北村岳 伸 稲垣孝一	土木学会全国大会 第76回年次学術講演 会			202109	2
ASRIによる膨張が接着系あと施工アンカーの引抜 耐力に及ぼす影響に関する研究	波多野文人 山本大介 福永 隆之 佐川康貴 濱田秀則	土木学会全国大会 第76回年次学術講演 会			202109	2
表面被覆されたケーブルの渦流探傷検査による非 破壊腐食診断に関する検討	増村美聖 何東風 西村徹也 土谷浩一	土木学会全国大会 第76回年次学術講演 会			202109	2
Variations in seismic retrofit design of cable- stayed bridges of different sizes	金田崇男 山口和範	IABSE Congress Ghent 2021			202109	8
Economic Effect of Honshu-Shikoku Bridges (産業連関モデルによる効果額計測)	小山智 佐藤高通 遠香尚史	16th REAAA Conference (第16回REAAA会議)			202109	9
多々羅大橋の耐震補強設計	金田崇男 西谷雅弘	高速道路と自動車 第64巻 第10号	64	10	202110	4
Uリブ鋼床版におけるビード亀裂の検査技術なら びに装置の開発	溝上善昭	MECHAVOCATION2022 日本機械学会関西 支部			202111	1
しまなみ海道自転車道の安全対策の向上	矢野賢晃 徳直哉	第34回日本道路会議 論文集			202111	2
明石海峡大橋に発生した舗装ひび割れの要因推定	樋口勇輝 竹中真也 田中杏 奈 黄木秀実 大爺健司 二 宮仁司	第34回日本道路会議 論文集			202111	2
西瀬戸自動車道のボックスカルバートの補修方法 検討について	信重和紀 寺嶋賢策 北村岳 伸 吉田彰	第34回日本道路会議 論文集			202111	2
長大吊橋のケーブル部材の状態を考慮した解析的 検討	金田崇男 有馬敬育	第34回日本道路会議 論文集			202111	2
長大斜張橋のケーブル部材の状態を考慮した解析 的検討	有馬敬育 金田崇男	第34回日本道路会議 論文集			202111	2
瀬戸大橋における無機ジンクリッチペイント凝集 破壊の補修状況と原因推定	大賀弘貴 竹口昌弘 山根彰	第34回日本道路会議 論文集			202111	2
Long-term Anti-corrosion Measures for Magosaki Viaduct by Cover Plate Method (孫崎高架橋の長期防食対策)	小林弘昌 臼田幸生 貴志友 基 長尾幸雄	18th IRF World Meeting & Exhibition (第18回IRF世界大 会)			202111	12
瀬戸大橋 (道路鉄道併用橋) の強靱化	西谷雅弘	基礎工	50	1	202201	3

題 名	著 者	雑誌名等	巻	号	年月	頁
Seismic retrofit of a long-span suspension bridge with emphasis on tower-girder collision problem	遠藤和男 溝上善昭 河野慎也	PIARC World Winter Service and Road Resilience Congresses in Calgary			202202	12
S字型ラッピングワイヤを用いた吊橋主ケーブル送気乾燥システムの防食効果	薄井稔弘 大西諒 馬詰大地	高速道路と自動車	65	3	202203	4
Improvement of inspection and maintenance gantries in the Honshu Shikoku Bridges (本州四国連絡橋の点検・維持管理作業車の改良について)	今井清裕 遠藤和男 廣田昭次 松尾俊宏	Structure and Infrastructure Engineering			202204	15

※本四技報，技術発表会は除外。

本四技報編集委員会・幹事会名簿(五十音順)令和4年1月25日現在

委員長	福永	勸	幹事長	西谷	雅弘
委員	遠藤	和男	幹事	有馬	敬育
	後藤	敦平		池田	秀繼
	澤	純史		北村	岳伸
	杉山	剛弘		蔵森	和生
	西谷	雅史		河野	正樹
	布廣	淳史		高森	敏博
	廣田	昭次		田中	輝良
	藤城	忠朗		遠山	直樹
	宮口	典博		東窪	則文
	向原	和明		藤城	忠朗
	村上	博基		藤田	憲二
	森下	尊久		三橋	直樹
				森	正俊
				横井	芳輝
				吉丸	直明

本四技報 第138号

発行 令和4年6月15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>



古紙/PLP配合率70%再生紙を使用