

本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.37 No.119 2012.9

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119号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.119

【巻頭言】

想定外……………安全技術部長	平 原 伸 幸… 1
Beyond Expectation	

【技術論文】

海峡部長大橋の塗膜状況調査……………長大橋技術センター 総括・防食グループサブリーダー	大 塚 雅 裕… 2	
Investigation on paint film of Honshu-Shikoku Bridges	保全部 橋梁保全課長代理	森 脇 正 生
鋼床版伸縮装置セットボルトの腐食診断手法と腐食原因の推定 ……	坂出管理センター 橋梁維持第二課長代理	村 井 俊 之…10
Corrosion diagnosis technique and estimate of the corrosion cause on expansion joint set bolts of steel deck plate	坂出管理センター 橋梁維持第二課長	小 林 克 己
	神戸管理センター 計画課付	大 爺 健 司
	(前)坂出管理センター 橋梁維持第二課	
来島海峡大橋ケーブル送気設備の改善と効果……………しまなみ今治管理センター 施設課	松 葉 真 人…16	
Improvement and Effect of Dry-air injection system for main cables of the Kurushima-Kaikyo Bridges	しまなみ今治管理センター 施設課長代理	小 野 祥 史
道路照明柱の基部腐食問題への対応……………保全部 電気通信課長代理	明 野 晃 治…23	
～判断基準等の策定～		
Countermeasures against the Problems of the Corroded Base of the Road Lighting Poles - Establishment of the Standard for Determination against the Road Lighting Poles Corroded -		
走行型計測技術によるトンネル覆工コンクリートの調査 ……	保全部 道路保全課長	今 井 清 裕…30
Tunnel inspection by using mobile imaging technology	保全部 道路保全課長代理	杉 山 剛 史

【海外報告】

バン格拉デシユの道路・橋梁事情……………しまなみ今治管理センター 技術管理役	伊 藤 豊 明…38	
Overseas Report	(前)国際協力機構(JICA)長期専門家	
(Roads and Bridges in People's Republic of Bangladesh)	(バン格拉デシユ 運輸省 道路局)	

【長大橋技術センター アニュアルレポート】

マスコンクリート塗装の健全性調査……………長大橋技術センター 総括・防食グループリーダー	萩 原 勝 也…43	
Study on Soundness of Coating for Mass Concrete Structures	神戸管理センター 計画課長	古 村 学
	(前)長大橋センター 総括・防食グループサブリーダー	
	長大橋技術センター 総括・防食グループサブリーダー	花 井 拓
動態観測の成果と更新計画……………長大橋技術センター 耐風・耐震グループリーダー	福 永 勸…45	
Observation Results and updating plan of the bridge monitoring system		
明石海峡大橋主塔の制振対策再評価……………長大橋技術センター 耐風・耐震グループリーダー	福 永 勸…47	
Re-evaluation for Vibration Control of the Main Towers of the Akashi Kaikyo Bridge	長大橋技術センター 耐風・耐震グループサブリーダー	竹 口 昌 弘
赤外線サーモグラフィ法による疲労亀裂の検出……………長大橋技術センター 診断・構造グループリーダー	小 林 義 弘…49	
A study on fatigue crack detection for bridges using infrared thermography	長大橋技術センター 診断・構造グループサブリーダー	川 端 淳
	長大橋技術センター 診断・構造グループ	溝 上 善 昭
工業用内視鏡の狭隘部の点検への適用性検討……………長大橋技術センター 診断・構造グループリーダー	小 林 義 弘…51	
A study on inspection of narrow sections in bridges using industrial video-scope	長大橋技術センター 診断・構造グループサブリーダー	川 端 淳
	長大橋技術センター 診断・構造グループ	溝 上 善 昭

【技術ニュース】

……………	53
The latest information	

【文献紹介】

……………	56
Related technical report in other publications	

鋼床版伸縮装置セットボルトの腐食診断手法

Corrosion diagnosis technique on expansion joint set bolts of steel deck plate

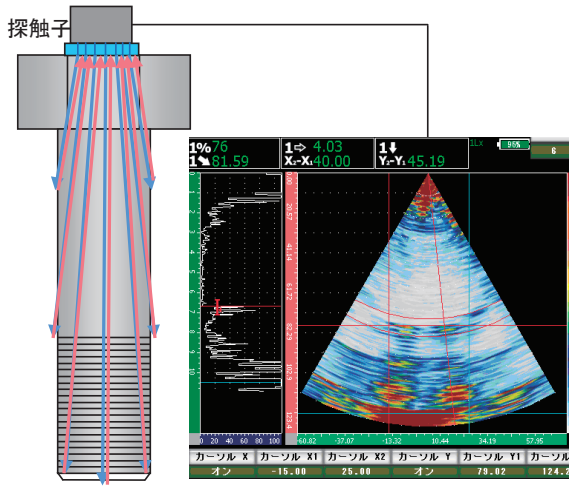


図-1 フェイズドアレイ超音波探傷法概要図
Phased array ultrasonic inspection method

写真-1 フェイズドアレイ超音波探傷法による測定状況
Measurement situation by phased array ultrasonic inspection method



写真-2 セットボルトの断面欠損状況
Section loss situation of set bolts

来島海峡大橋ケーブル送気設備の改善と効果

Improvement and Effect of Dry-air injection system for main cables of the Kurushima-Kaikyo Bridges



写真-1 プレクーリング設備の追加設置
Extension of the Pre-cooling Facility

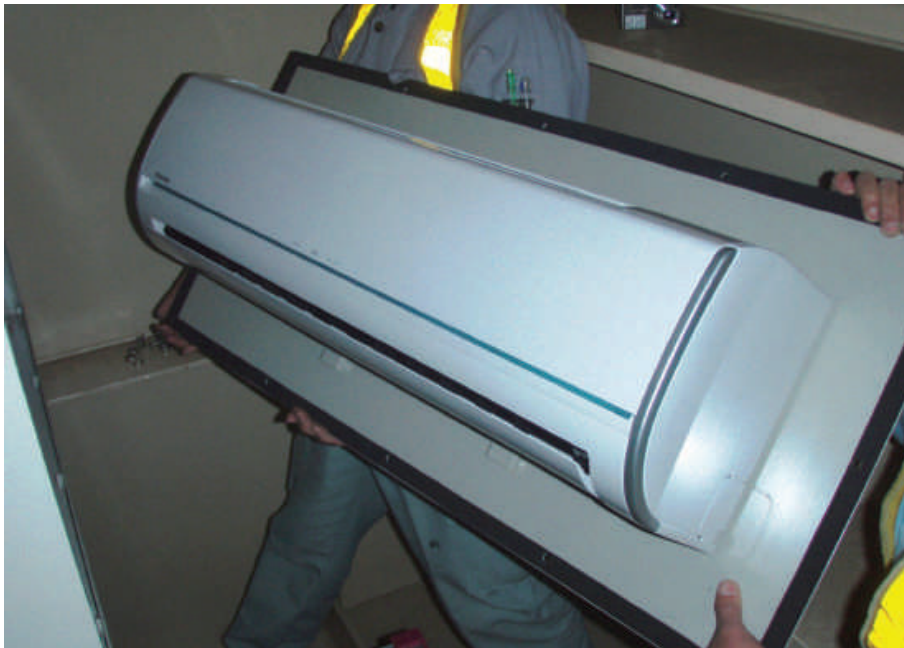


写真-2 室内機の設置
Installation of the Interior unit

走行型計測技術によるTN覆エコンクリートの調査

Tunnel inspection by using mobile imaging technology



写真-1 レーザー計測車両による計測状況
Tunnel inspection by using laser beam



写真-2 ハイビジョンカメラ計測車両による計測状況
Tunnel inspection by using high-vision camera



写真-3 ハイビジョンカメラ計測車両
Monitoring vehicle with high-vision camera

想 定 外

Beyond Expectation

安全技術部長 平 原 伸 幸

Nobuyuki Hirahara

安全技術部。この部署に移ってから、事故・災害等の事象が発生する前の平常時における基準・マニュアル等の整備、各種訓練の計画立案・実践及び他機関との協力体制の構築、また、事象が発生してからの異常時における個別の対応等、本四道路に絡む安全に関する様々な事柄が飛び込んでくる。

この原稿を書いているのは、9月上旬。もうすぐあの東日本大震災（2011年3月11日）から1年半が経とうとしている。そういえば、あの頃、TVでよく飛び交っていたあの言葉、「想定外」を思い出した。

東日本大震災の被害では、同じ東北の太平洋沿岸に立地する東京電力の福島第1原発と東北電力の女川原発が明暗を分けた。福島第1原発が多くの住民を故郷から引き離れた半面で、女川原発では壊滅的被害となった女川町民の一時的な避難所となっていたという。2つの原発の明暗が分かれたのは何だったのだろうか？

福島第1原発（1967年着工）と女川原発（1980年着工）の間には、宮城県沖地震（1978年6月12日、M7.4、最大震度5、死者28人）が発生しており、女川原発では耐震対策というリスク管理の面で、原子炉本体を含む主要設備の設置高（海面上約15m）、非常用ディーゼル発電機の高台への設置、複数の送電経路の整備、等々きめ細かい配慮がなされていたらしい。これらにより、未曾有の地震・津波の襲来に対しても、フェイルセーフが機能したのである。

私たちが所掌する本四道路に置き換えて考えてみると、それぞれの構造物は、整備された時期が異なるため、必要に応じて、入力地震波の見直し等の新たな知見を取り入れて、耐久性の評価を行い、適切な時期に補強を行うこととなっている。なお、建設時においては、過去に例のない規模の構造物が対象であったため、先人たちはわが国の技術の粋を結集して、各種調査・試験の実施、基準類の制定、新技術の開発、施工性の確認というように、それぞれの段階を踏んで課題の解決にあたりるとともに、将来、起こり得る「想定外」の事象に対しても対応できるよう、各方面でさまざまな配慮がなされている。

こうしたハード面における取り組みとともに、ソフト面では日常における点検等により、損傷予備軍といえる顕在化していない各種の変状・兆候が捉え、それらの程度に応じて、具体の対応方法・時期等が概ね事前に定められている。点検等で見つかる変状を何かのシグナルと見るか見逃すかは、特定の分野では計測機器の開発等による定量化された評価の取り組みも見られるものの、多くは担当する技術者の長年の経験と知識に裏打ちされた勘に依るところが大である。私たちは、「200年以上の長期にわたり利用される橋をめざし、万全な維持管理に努める」ことを経営理念に掲げたJB本四高速の職員であり、「想定外」という言い訳は許されない。瀬戸内海を渡る長大橋梁群の維持管理という自分たちの仕事に誇りを持ち、平常時においては、事故や危機がなるべく発生しないように、感覚を研ぎ澄ませて心配りの効いた「リスク管理」を入念に行い、何か異常が認められたときは適切な「危機管理」対応でもって、常にお客さまに安全・安心・快適な道路環境を提供し、経営理念の実現に向けて精進していきたい。

海峡部長大橋の塗膜状況調査

Investigation on paint film of Honshu-Shikoku Bridges

長大橋技術センター 総括・防食グループサブリーダー

大塚 雅裕

Masahiro Otsuka

保全部 橋梁保全課長代理

森 脇 正 生

Masao Moriwaki

概 要

本州四国連絡高速道路の海峡部長大橋には重防食塗装が施され、約400万 m^2 の外表面積を有している。このうち、旧塗装仕様のポリウレタン樹脂塗料を表層に施したものは全面積の6割以上を占め、供用開始から20年以上が経過し、順次塗替塗装を実施しているところである。今後、これらの塗装費用が徐々に増大していくことから、近い将来塗替塗装を実施することになるポリウレタン仕様の橋梁を対象に、より合理的な塗替計画を検討するために塗膜状況調査を実施し、塗膜の消耗劣化特性および劣化進行状況を確認した。その結果、塗膜の消耗速度は、既往の塗膜劣化予測に用いられた速度よりも遅い傾向にあることが判明した。

Heavy-duty coating has been applied to the Honshu-Shikoku Bridges. Coating area of steel members in the bridges amounts to about 4 million m^2 . More than 60 percent of surface coating area is coated by polyurethane resin paint according to the old paint specification. More than twenty years has passed since the bridges painted by the old specification had opened. Repainting work of the bridges has been conducted in series. In order to make a repainting plan for the bridges painted by the old specification reasonable in preparation for future repainting cost increase, investigation on paint film of the bridges was conducted, and the characteristics of paint film deterioration and the deterioration status of paint film were confirmed. As a result, it was found that the reduction rate of paint film thickness is smaller than that used in the past repainting plan.

1. はじめに

平成2年4月に本州四国連絡橋（以下、「本四連絡橋」という）の鋼橋等塗装基準が全面改訂され¹⁾、海峡部長大橋の外表面積の上塗りにはふっ素樹脂塗料が採用されることとなった。この改訂基準を適用する以前に建設された海峡部長大橋には、塩ゴム系塗料を上塗りとする大三島橋を除き、ふっ素樹脂塗料に比べて耐久性に劣るポリウレタン樹脂塗料（以下、「旧塗装仕様」という）が用いられている。旧塗装仕様は、神戸淡路鳴門自動車道の大鳴門橋や門崎高架橋、瀬戸中央自動車道の下津井瀬戸大橋や櫃石島橋などからなる瀬戸大橋、西瀬戸自動車道の因島大橋、生口橋、伯方・大島大橋などに適用されており、このうち因島大橋、大鳴門橋の2橋が全面塗替塗装を完了している。

海峡部長大橋の外表面積は、中塗り塗膜が消耗するまでに塗替塗装を行うのが経済的であり、適切な時期に塗り替えを行うためには上塗り及び中塗り塗膜の劣化予測の精度が重要になる。因島大橋、大鳴門橋においても塗

替塗装の時期を決定するために塗膜の劣化調査を行い、塗替計画に反映させた。

現在、塗替塗装を実施中の橋梁及び未だ最初の塗り替えに着手していない橋梁が多く残っており、合理的かつ確実に塗装の管理を行うことを目的に、塗膜状況調査を行い、現状の消耗状態の評価を行った。

本稿では、平成22年度に旧塗装仕様を対象に実施した塗膜調査の結果及び消耗劣化特性の評価の結果について報告する。

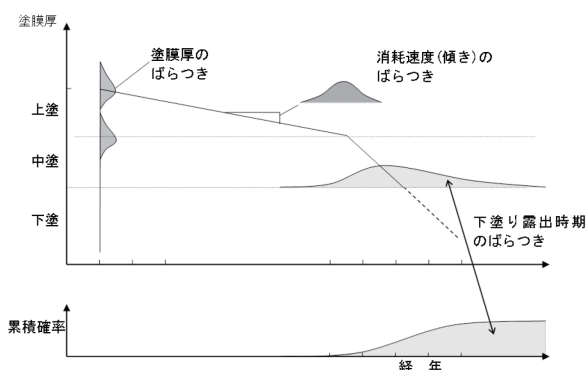
2. 本四連絡橋の重防食塗装仕様

本四連絡橋は、腐食環境が非常に厳しく、塗替期間を延ばすため、建設時（新設塗装）から防せい力、耐久性に優れた重防食塗装系（表-1）を標準仕様としてきた。重防食塗装は、鋼板と下地の付着力を高めるために素地調整にはブラストを、下地には犠牲防食効果を期待して無機ジンクリッチペイントを採用している。この上に、無機ジンクリッチペイントを保護する耐水性に優れたエ

表一 本四連絡橋の外面塗装仕様

Table 1 Initial paint specification for Honshu-Shikoku Bridges

	素地調整	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層	第6層	合計膜厚
昭和55年 塗装基準	製品プラスト	厚膜型無機 ジンクリッチ ペイント (75)	ミストコート (-)	厚膜型 エポキシ樹脂 塗料下塗 (60)	厚膜型 エポキシ樹脂 塗料下塗 (60)	ポリウレタン 樹脂塗料用 中塗 (30)	ポリウレタン 樹脂塗料上塗 (30)	255
平成2年 改訂基準	製品プラスト	厚膜型無機 ジンクリッチ ペイント (75)	ミストコート (-)	厚膜型 エポキシ樹脂 塗料下塗 (60)	厚膜型 エポキシ樹脂 塗料下塗 (60)	エポキシ樹脂 塗料中塗 (30)	ふっ素樹脂 塗料上塗 (25)	250



図一 劣化曲線のイメージ
Fig.1 Image of coating deterioration curve

ポキシ樹脂塗料、中塗りを介して耐候性に優れたポリウレタン樹脂塗料またはふっ素樹脂塗料を用いている。

無機ジンクリッチペイントまで劣化した後に現場で下地から施工し直す場合、プラストや無機ジンクリッチペイントの施工品質の確保が難しく、また費用も膨大となる。したがって、無機ジンクリッチペイントを保護する下塗りが極力露出しない段階までに消耗・劣化した上塗り・中塗り塗膜を塗り替える予防保全的な管理を行うのが合理的であり、適切な時期に塗り替えを行うために塗膜消耗の劣化予測を行っている。

多くの年月をかけて膨大な面積の塗装を行うこととなるため、塗り替えが遅れることがないようにするためには塗膜劣化予測の精度が重要となる。

3. 塗膜消耗特性に関する既往のデータ

3.1 劣化予測の概要

保安全管理要領 第2編「2-2 塗替塗装」²⁾では、下塗り塗膜が露出する前に全面塗替塗装が完了することを前提として開始時期を決定する必要があり、塗膜寿命の予測精度を向上させるために点検データの蓄積が不可欠であると解説している。また橋ごとに劣化曲線を作成し、塗膜寿命を推定する必要があるとしている。

図一は、塗膜劣化曲線のイメージであり、塗膜表面の消耗劣化を想定している。上塗り及び中塗り塗膜が消失する過程はばらつき、それを考慮して将来の下塗りの露出状態を予測するものである。塗膜の劣化予測の精度を向上させるためには、残存塗膜厚のばらつきや消耗速

度のばらつきを精度良く調査してその特性を把握し、予測に適切に反映させる必要がある。

過去に塗替塗装を行った長大橋の塗替計画においても、塗膜劣化予測を行っているが、残存膜厚や消耗速度の特性値に関して精度の良い情報が得られていないことがあった。

3.2 因島大橋の劣化予測データ

因島大橋は、補剛桁を平成7年～17年に、主塔を19年～22年にかけて塗り替えている。

塗替計画策定にあたり、残存膜厚は、塗膜片の断面顕微鏡観察により計測を行い、対数正規分布の膜厚分布特性であることを確認し、その膜厚データを塗膜劣化予測に資した。

また消耗速度については、現地塗膜の消耗速度を推定すべく各種調査を実施したが、推定には至らず、既往の海浜暴露試験のデータを基に、ポリウレタン樹脂塗料の消耗速度は $2\mu\text{m}/\text{年}$ 、エポキシ樹脂塗料は $10\mu\text{m}/\text{年}$ と想定した³⁾。

3.3 大鳴門橋の劣化予測データ

大鳴門橋は、補剛桁を平成10年度～17年度に、主塔を16年度～18年度にかけて塗り替えている。

残存膜厚及び経年の消耗量の変化は、電磁膜厚計を用いて計測し、塗膜劣化予測に資している。経年の消耗量変化から求める消耗速度は、日照や風雨等の環境が最も厳しい上弦材で $7\mu\text{m}/\text{年}$ 以上と非常に大きな値が得られており、架橋地点の海象、気象条件が他の本四連絡橋と著しく異なると考えられた。

ただし、電磁膜厚計の測定誤差、鋼材表面の凹凸の不均一さなどによる消耗速度推定値の精度の問題も指摘されており、膜厚以外の腐食等調査の結果も含め総合的に評価して塗替実施時期を決定している⁴⁾。

3.4 瀬戸大橋の劣化予測データ

瀬戸大橋は、平成18年度より塗替塗装に本格着手し、塗装工事は現在継続中である。

消耗速度の推計は、4.2で説明する、採取した塗膜片の断面を顕微鏡で観察して消耗量を計測する手法により行った。この時、塗膜消耗が計測できる箇所として、補



写真-1 格点ナンバー

Photo.1 Panel Number



写真-2 膜厚計測装置

Photo.2 Thickness measuring instrument

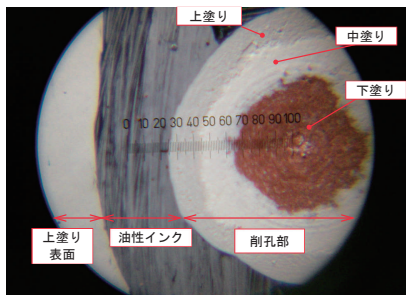


写真-3 塗膜断面

Photo.3 Section of paint film

剛桁の主横トラスに付けられた格点のナンバー部分を調査した(写真-1)。鋼床版があることから日照条件が必ずしも厳しくない条件下において、上塗りの消耗速度は $0.4\mu\text{m}/\text{年}\sim 1.5\mu\text{m}/\text{年}$ というデータが得られている⁹⁾。

4. 調査

4.1 残存膜厚調査

塗替塗装に着手して間もない橋梁及び近い将来塗り替えが計画されているポリウレタン樹脂塗料を上塗りとする9橋の長大橋を調査対象とし、上塗りと中塗りの残存膜厚を計測した。

(1) 調査手法

各層の塗膜厚を計測するには、塗膜の断面を顕微鏡で観察するために微破壊することとなる。これまで、微小塗膜片を採取し、室内で顕微鏡観察する手法を用いた調査が行われてきたが、時間と手間がかかり、統計的な処理が行えるだけの十分なサンプルを得るのが困難なため、この調査では、現地でドリル削孔して塗膜断面を観察する手法を採用した。

表-2 調査対象とする橋梁及び構造単位

橋梁名	構造単位	調査数
門崎高架橋	主桁(箱桁)、鋼床版	315
下津井瀬戸大橋	補剛桁(トラス)、鋼床版、主塔	464
岩黒島橋	主桁(トラス)、鋼床版、塔	499
与島橋	トラス桁、鋼床版	321
南備讃瀬戸大橋	補剛桁(トラス)、鋼床版、主塔	464
番の州高架橋	トラス桁、鋼床版	321
生口橋	主桁(箱桁)、塔	452
伯方橋	主桁(箱桁)	308
大島大橋	主桁(箱桁、版桁)、主塔	450

※門崎高架橋の下り線側腹板・ブラケット部は調査対象外

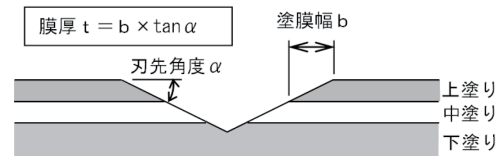
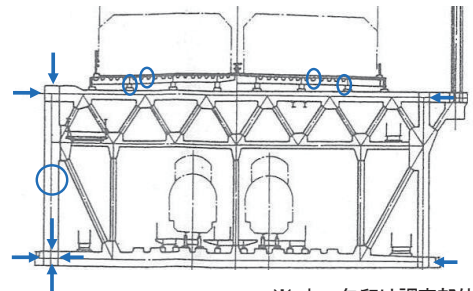


図-2 膜厚計測の概念図

Fig.2 Concept of film thickness measurement



※ 丸、矢印は調査部位

図-3 調査部位の例(下津井瀬戸大橋)

Fig.3 Measure points in cross section (Shimotsui-Seto Br.)

調査面をアルコール拭きし、判別を容易にするためにあらかじめ油性ペンで塗膜表面を着色した後、ドリルと50倍の顕微鏡を有する膜厚計測装置(写真-2)により削孔、膜厚計測を行った。本装置での計測は、顕微鏡内の目盛り(写真-3)の読み値を図-2のようにドリルの刃の角度に応じて膜厚に換算するものである。

(2) 調査対象部位

調査数は、統計処理を行う1単位(以下、「構造単位」という)と信頼性の関係、調査の費用や期間等を検討し、1構造単位について150点以上を目安とした。トラス桁形式について桁部と鋼床版部とをそれぞれ150点程度、塔を150点程度調査した。箱桁形式は構造単位を細分化せず300点程度を目安とした。

調査対象の構造単位及び調査数を表-2に示す。

各調査箇所は、統計処理を行うことから近接可能な範囲でできるだけ無作為に選定した。図-3は、調査位置の例(下津井瀬戸大橋補剛桁)である。

(3) 調査結果

残存塗膜厚にはばらつきがあり、その分布は対数正規分布に近い傾向にある。図-4は、門崎高架橋の上塗り

表-3 橋梁別残存膜厚

Table 3 Thickness of remaining paint film

	門崎高架橋		下津井瀬戸大橋 補剛桁				岩黒島橋 主桁			与島橋 トラス桁		南備瀬戸大橋 補剛桁		番の州高架橋 トラス桁		生口橋		伯方橋		大島大橋					
	主桁	桁	鋼床版	桁	鋼床版	塔	桁	鋼床版	桁	鋼床版	桁	鋼床版	桁	塔	主桁	中央径間	側径間	5P主塔	6P主塔	中央径間	側径間	5P主塔	6P主塔		
上塗り	サンプル数	303	153	156	152	156	139	154	156	155	153	163	156	297	132	308	147	152	63	63					
	最大値	120	160	120	140	70	100	120	90	110	100	90	120	120	130	90	120	84	110	64					
	最小値	4	4	10	0(1)	8	4	2	6	0(3)	8	0(2)	4	4	4	30	8	0(4)	8	12	4				
	平均値	33.4	36.1	34.6	32.7	26.4	36.3	29.7	30.6	31.1	35.0	26.8	32.1	33.7	76.5	23.9	32.4	32.9	61.5	26.5					
	標準偏差	21.9	24.8	18.2	26.6	11.5	23.6	22.0	20.5	28.9	18.0	17.4	20.9	17.7	25.1	9.7	26.7	13.3	20.9	15.3					
変動係数	0.66	0.69	0.52	0.81	0.44	0.65	0.74	0.67	0.93	0.51	0.65	0.65	0.53	0.33	0.41	0.82	0.40	0.34	0.58						
中塗り	サンプル数	315	156	156	156	156	143	165	156	156	165	156	300	152	308	154	152	72	72						
	最大値	100	90	120	130	150	130	82	110	180	140	120	120	90	100	116	160	90	82						
	最小値	10	20	16	16	8	10	20	10	0(1)	10	10	10	10	14	12	10	16	14	16					
	平均値	40.4	41.1	42.3	43.0	49.0	50.9	42.7	40.9	45.9	56.3	38.3	42.0	39.4	49.9	39.6	55.8	44.5	40.8	37.8					
	標準偏差	18.0	13.6	16.1	16.0	25.9	22.7	14.2	17.2	20.6	22.4	16.9	19.4	15.0	20.1	16.8	31.3	15.8	16.2	14.5					
変動係数	0.45	0.33	0.38	0.37	0.53	0.45	0.33	0.42	0.45	0.40	0.44	0.46	0.38	0.40	0.42	0.56	0.36	0.40	0.38						

※1 特性値は、対数正規分布として算出した値。ただし、大島大橋5P主塔は対数正規分布しないため、単純集計した。

※2 ()内は計測値がゼロの数

※3 上塗り残存膜厚がゼロ値のサンプルは特性値算出の際控除した。

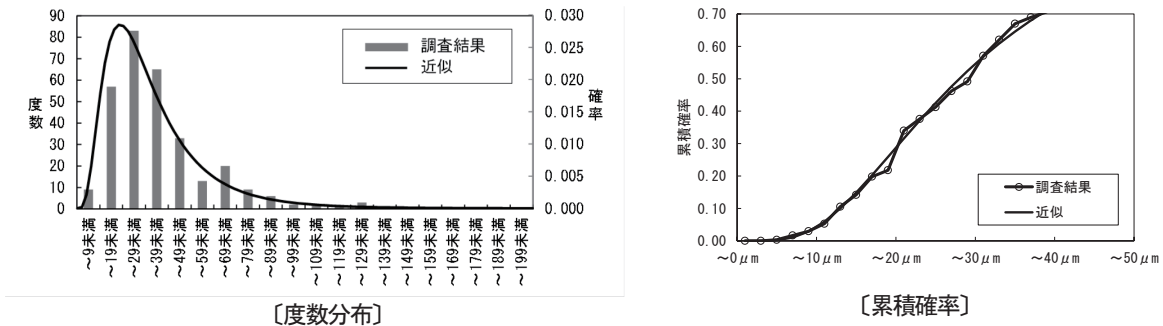


図-4 上塗り残存膜厚分布の例(門崎高架橋)

Fig.4 Distribution of remaining paint film (Tozaki Viaduct)

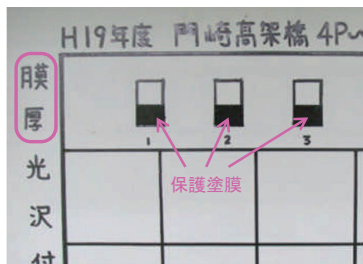


写真-4 塗膜調査定点
Photo.4 Fixed measure point

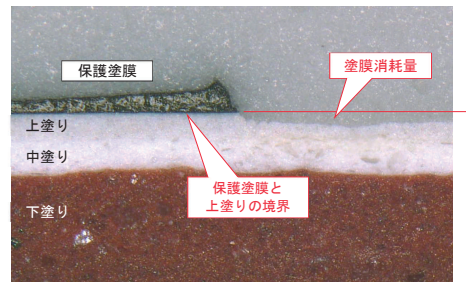


写真-5 塗膜断面
Photo.5 Section of paint film

の残存膜厚分布であり、前述の因島大橋の調査結果においても同様の傾向が見られていた。

表-3に、各橋梁の残存膜厚の特性値の一覧を示す。ここで、平均値、標準偏差は対数正規分布として算出した値である。上塗り、中塗りともに基準膜厚は30μmである。

桁及び鋼床版について、平均値は上塗りの24~36μmに対し、中塗りは38~56μmであり、上塗りの平均値が相対的に小さい。なお、消耗速度が遅いと考えられる瀬戸大橋鋼床版の残存膜厚についても同様の傾向が見られることから、両者の差には、上塗りの消耗劣化の影響の他に、工場塗装時において流れ限界膜厚が小さく施工管理が相対的に難しい上塗り塗料の方が薄くなる傾向にあったと思われる。

標準偏差を平均値で除した変動係数は、上塗りが0.4

~0.93、中塗りが0.33~0.56であり、上塗りが相対的に大きい。上塗りの変動係数が大きいのは、製作時の初期膜厚のばらつきに、塗膜消耗量のばらつきの要因が付加されたためと考えられる。

4.2 ポリウレタン樹脂塗料の消耗速度

保全管理要領 第2編「2-1 定点塗膜調査」⁶⁾に基づき消耗速度の調査を実施した。旧塗装仕様については、長大橋1橋あたりの定点は5~14箇所と多くないため、本稿では、平成22年度に瀬戸大橋数橋において同時期に計測したデータから消耗の傾向を検討した結果を報告する。

(1) 調査手法

上塗りの消耗速度は、長大橋に設けた定点(写真-4)において塗膜の一部に保護塗膜を塗布して特定の時間を待ち、写真-5のように保護塗膜近傍の塗膜断面を顕微

表-4 瀬戸大橋の定点塗膜調査箇所一覧

Table 4 Fixed measure points on Seto-Ohashi Bridges

橋梁名	調査部位	箇所数
下津井瀬戸大橋	3P主塔水平材(2), 3P主塔塔柱基部(2), 鋼床版(1)	5
岩黒島橋	3P塔水平材(2)及び基部(2), 中央径間主桁主構上弦材(4), 側径間主桁主構下弦材(4), 鋼床版(2)	14
与島橋	トラス桁主構上弦材(6), トラス桁主構下弦材(6), 鋼床版(2)	14
南備讃瀬戸大橋	5P塔斜材(2)及び塔柱基部(2), 側径間補剛桁主構下弦材(4), 中央径間補剛桁主構上弦材(4), 鋼床版(2)	14
番の州高架橋	トラス桁主構上弦材(8), トラス桁主構下弦材(4), 鋼床版(2)	14

※ () 内の数値は定点箇所数

表-5 上塗り塗膜消耗量調査結果(瀬戸大橋)

Table 5 Reduction of surface coat film thickness (Seto-Ohashi Bridges)

橋梁・部位						方向	経過年数	消耗量	消耗速度	橋梁・部位						方向	経過年数	消耗量	消耗速度							
下津井瀬戸大橋										与島橋																
3P主塔	水平材東側	西面	4.2年	3 μm	0.7 μm/年	鋼床版	格点7-8間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年	南備讃瀬戸大橋	5P主塔	第二斜材東側	上面	4.2年	4 μm	1.0 μm/年								
		東面	4.2年	4 μm	1.0 μm/年		格点18-19間東側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年			第二斜材西側	上面	4.2年	4 μm	1.0 μm/年								
	水平材西側	東面	4.2年	3 μm	0.7 μm/年	東側塔柱基部	東面	4.2年	3 μm	0.7 μm/年	西側塔柱基部	西面		4.2年	3 μm	0.7 μm/年	東側塔柱基部	西面	4.2年	3 μm	0.7 μm/年					
		西面	4.2年	0 μm	0.0 μm/年		西側塔柱基部	東面	4.2年	0 μm		0.0 μm/年		西側塔柱基部	東面	4.2年		0 μm	0.0 μm/年							
	鋼床版	格点86-87間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点62-63間東側	上面	4.2年	3 μm	0.7 μm/年		格点62-63間西側	上面	4.2年	3 μm	0.7 μm/年	主構下弦材	格点114-115間東側	下面	4.2年	0 μm	0.0 μm/年		
岩黒島橋	3P主塔	水平材東側	西面	4.2年	3 μm	0.7 μm/年	水平材西側	東面	4.2年	2 μm	0.5 μm/年	東側塔柱基部	東面	4.2年	0 μm	0.0 μm/年	西側塔柱基部	西面	4.2年	1 μm	0.2 μm/年	格点14-15間東側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年
			東面	4.2年	0 μm	0.0 μm/年		格点33-34間西側	下面	4年	0 μm		0.0 μm/年	格点14-15間西側	下面	4年		0 μm	0.0 μm/年							
	鋼床版	格点14-15間東側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年	主構下弦材	格点14-15間東側	下面	4.2年	0 μm	0.0 μm/年	格点14-15間西側	西面	4.1年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点33-34間東側	上面	4.1年	4 μm	1.0 μm/年			
			東面	4.1年	3 μm	0.7 μm/年		格点33-34間西側	上面	4.1年	4 μm	1.0 μm/年		格点33-34間西側	西面	4.1年	4 μm		1.0 μm/年							
	与島橋	主構上弦材(羽佐島)	格点7-8間東側	東面	4.1年	3 μm	0.7 μm/年	主構下弦材(羽佐島)	格点7-8間西側	下面	4.1年	2 μm	0.5 μm/年	主構上弦材	格点7-8間東側	東面	4年	3 μm	0.8 μm/年	主構下弦材	格点7-8間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年	
格点7-8間西側			上面	4.1年	3 μm	0.7 μm/年	格点7-8間東側		東面	4年	3 μm	0.8 μm/年	格点7-8間西側		下面	4年	0 μm	0.0 μm/年								
主構下弦材		格点7-8間東側	西面	4.1年	3 μm	0.7 μm/年	主構上弦材	格点7-8間西側	下面	4.1年	2 μm	0.5 μm/年	主構下弦材	格点7-8間東側	西面	4年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点18-19間東側	東面	4年	0 μm	0.0 μm/年		
		格点7-8間西側	上面	4年	4 μm	1.0 μm/年		格点7-8間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年		格点18-19間西側	上面	4年	3 μm	0.8 μm/年		格点18-19間東側	西面	4年	0 μm	0.0 μm/年		
主構下弦材		格点7-8間東側	西面	4年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点7-8間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年	主構下弦材	格点7-8間東側	西面	4年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点18-19間西側	上面	4年	3 μm	0.8 μm/年		
		格点7-8間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年		格点18-19間東側	東面	4年	0 μm	0.0 μm/年		格点18-19間西側	西面	4年	0 μm	0.0 μm/年								
主構上弦材		格点18-19間東側	東面	4年	0 μm	0.0 μm/年	主構下弦材	格点18-19間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点18-19間東側	東面	4年	0 μm	0.0 μm/年	主構下弦材	格点18-19間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年		
		格点18-19間西側	上面	4年	3 μm	0.8 μm/年		格点18-19間東側	西面	4年	0 μm	0.0 μm/年		格点18-19間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年								
番の州高架橋		主構上弦材	格点5-6間東側	上面	3.9年	4 μm	1.0 μm/年	主構下弦材	格点15-16間東側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点28-29間東側	上面	3.9年	3 μm	0.8 μm/年	鋼床版	格点5-6間東側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年	
			格点5-6間西側	上面	3.9年	2 μm	0.5 μm/年		格点15-16間西側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年		格点28-29間西側	上面	3.9年	2 μm	0.5 μm/年		鋼床版	格点28-29間東側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年
		主構下弦材	格点15-16間東側	西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点15-16間西側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構下弦材	格点28-29間東側	東面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	鋼床版	格点5-6間西側	上面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	
			格点15-16間西側	西面	3.9年	2 μm	0.5 μm/年		格点28-29間西側	上面	3.9年	2 μm	0.5 μm/年		格点28-29間東側	西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年							
		主構上弦材	格点28-29間東側	上面	3.9年	3 μm	0.8 μm/年	主構下弦材	格点28-29間西側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点28-29間東側	東面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	鋼床版	格点28-29間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年	
			格点28-29間西側	上面	3.9年	2 μm	0.5 μm/年		格点28-29間西側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年		格点28-29間東側	西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年							
		主構下弦材	格点28-29間東側	西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点28-29間西側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構下弦材	格点28-29間東側	東面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	鋼床版	格点28-29間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年	
	格点28-29間西側		西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	格点28-29間西側		下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	格点28-29間東側		西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年								
	主構上弦材	格点5-6間東側	上面	3.9年	4 μm	1.0 μm/年	主構下弦材	格点5-6間西側	下面	3.9年	2 μm	0.5 μm/年	主構上弦材	格点5-6間東側	上面	3.9年	4 μm	1.0 μm/年	鋼床版	格点5-6間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年		
		格点5-6間西側	上面	3.9年	2 μm	0.5 μm/年		格点5-6間東側	西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年		格点5-6間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年								
	主構下弦材	格点15-16間東側	西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点15-16間西側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構下弦材	格点15-16間東側	西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	鋼床版	格点15-16間西側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年		
		格点15-16間西側	西面	3.9年	2 μm	0.5 μm/年		格点15-16間東側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年		格点15-16間西側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年								
	主構上弦材	格点28-29間東側	上面	3.9年	3 μm	0.8 μm/年	主構下弦材	格点28-29間西側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点28-29間東側	上面	3.9年	3 μm	0.8 μm/年	鋼床版	格点28-29間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年		
		格点28-29間西側	上面	3.9年	2 μm	0.5 μm/年		格点28-29間東側	西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年		格点28-29間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年								
	主構下弦材	格点28-29間東側	西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構上弦材	格点28-29間西側	下面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	主構下弦材	格点28-29間東側	東面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	鋼床版	格点28-29間西側	下面	4年	0 μm	0.0 μm/年		
格点28-29間西側		西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	格点28-29間東側		西面	3.9年	0 μm	0.0 μm/年	格点28-29間西側		下面	4年	0 μm	0.0 μm/年									

※ 消耗量が読み取れないものは0μmと表記した。

表-6 上塗り消耗速度特性値

Table 6 Characteristics reduction rate of surface coat thickness

部位	調査面の方向	サンプル数	最大値	最小値	平均値	標準偏差	変動係数
塔主構	上面	13	1.0 μm/年	0.5 μm/年	0.8 μm/年	0.2 μm/年	0.25
	側面 ^{※)}	30	1.0 μm/年	0.0 μm/年	0.4 μm/年	0.4 μm/年	1.00
	側面 ^{※)} (ゼロ値含まず)	17	1.0 μm/年	4.0 μm/年	0.7 μm/年	0.2 μm/年	0.29
	下面	9	0.5 μm/年	0.0 μm/年	0.1 μm/年	—	—
鋼床版	下面	9	0.0 μm/年	0.0 μm/年	0.0 μm/年	—	—

※ 側面は参考値

鏡で観察して上塗りの消耗量を計測し、年あたりの消耗量を求めるものである。

(2) 調査対象部位

平成17年に定点塗膜調査要領が改訂され、それまで実施されてきた電磁膜厚計による消耗量調査から顕微鏡観察による調査に移行したことから、定点は平成18年度に設けている。

表-4に瀬戸大橋の定点塗膜調査部位及び調査箇所数の一覧(旧塗装仕様のみ)を示す。

(3) 調査結果

瀬戸大橋で計測した上塗り塗膜の消耗速度の一覧表を表-5に、これを集計した結果を表-6に示す。

日射の影響が最も厳しいと考えられる部材上面の消耗速度は、平均値が0.8μm/年程度、最大値が1.0μm/年程度であり、前述した既往のデータに比べて小さい値となっている。日射の影響が最も小さい下面の消耗速度はほぼゼロである。

側面の消耗速度は、上面と下面の間にあると思われる。

表-7 中塗り・下塗りの消耗速度

Table 7 Reduction rates of middle coat thickness and under coat thickness

橋梁名	部位	経過年数	中塗り塗料		下塗り塗料	
			消耗量	消耗速度	消耗量	消耗速度
大鳴門橋 (H22調査)	主構上弦材上面	1.5年	10 μ m	6.7 μ m/年	11 μ m	7.3 μ m/年
	主構斜材上面 I	1.5年	10 μ m	6.7 μ m/年	8 μ m	5.3 μ m/年
	主構斜材上面 II	1.5年	9 μ m	6.0 μ m/年	9 μ m	6.0 μ m/年
	主構斜材外面	1.5年	10 μ m	6.7 μ m/年	9 μ m	6.0 μ m/年
	主構垂直材外面	1.5年	11 μ m	7.3 μ m/年	11 μ m	7.3 μ m/年
	鋼床版裏面 [※]	1.5年	0 μ m	0.0 μ m/年	0 μ m	0.0 μ m/年
櫃石島橋 (H22調査)	主構上弦材上面	1.3年	9 μ m	6.9 μ m/年	9 μ m	6.9 μ m/年
	主構斜材上面 I	1.3年	7 μ m	5.4 μ m/年	7 μ m	5.4 μ m/年
	主構斜材上面 II	1.3年	7 μ m	5.4 μ m/年	7 μ m	5.4 μ m/年
	主構斜材外面	1.3年	8 μ m	6.2 μ m/年	8 μ m	6.2 μ m/年
	主構垂直材外面	1.3年	8 μ m	6.2 μ m/年	8 μ m	6.2 μ m/年
	鋼床版裏面 [※]	1.3年	0 μ m	0.0 μ m/年	0 μ m	0.0 μ m/年
因島大橋 (H22調査)	主構上弦材上面	1.3年	11 μ m	8.5 μ m/年	10 μ m	7.7 μ m/年
	主構斜材上面 I	1.3年	7 μ m	5.4 μ m/年	7 μ m	5.4 μ m/年
	主構斜材上面 II	1.3年	9 μ m	6.9 μ m/年	8 μ m	6.2 μ m/年
	主構斜材外面	1.3年	11 μ m	8.5 μ m/年	10 μ m	7.7 μ m/年
	主構垂直材外面	1.3年	8 μ m	6.2 μ m/年	9 μ m	6.9 μ m/年
	鋼床版裏面 [※]	1.3年	0 μ m	0.0 μ m/年	0 μ m	0.0 μ m/年

※ 鋼床版裏面は消耗が読み取れないものを0 μ mと表記した。



写真-6 中塗り・下塗り塗膜の定点

Photo.6 Fixed measure point of middle coat and under coat

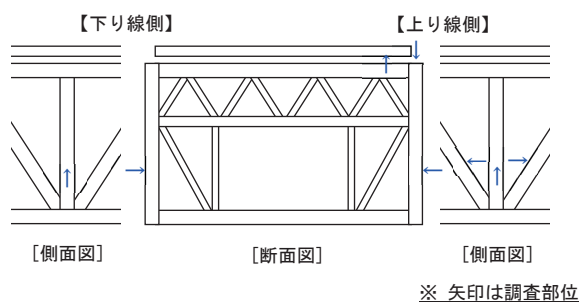


図-5 調査位置図
Fig.5 Measure points

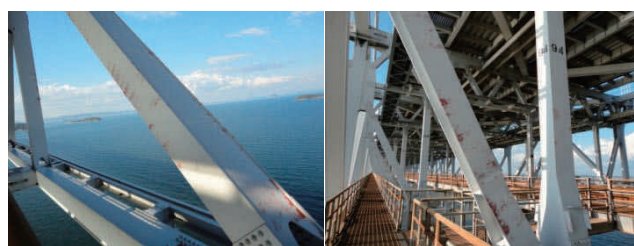


写真-7 南備讃瀬戸大橋の塗膜消耗

Photo.7 Consumption of coating on Minami Bisan-Seto Bridge

ばらつき (変動係数) が大きいのは、消耗量ゼロのデータが多いためであり、特に桁の内側 (東側部材の西面や西側部材の東面) のデータでゼロの値が目立つ。調査期間が約4年で決して長い期間でないこと、本手法の計測精度が1 μ m程度ということから、消耗量ゼロというデータについては、多少の消耗進行も考えられ、更に長期間のデータを蓄積していく必要がある。したがって、表-6の側面の集計結果については、参考値と考える必要がある。

4.3 エポキシ樹脂塗料の消耗速度

エポキシ樹脂の中塗り及び下塗り塗料は、上塗り塗料に比べて耐候性に劣り、消耗劣化が早く進行する。したがって、消耗速度のばらつきが劣化予測精度に与える影響は上塗り塗料に比べて小さくなるため、エポキシ樹脂塗料については本四三ルートそれぞれのそれぞれ1橋に限定して消耗量計測用定点を設け、その特性を調査している。

(1) 調査手法及び調査対象部位

消耗速度の推定方法は4.2 (1) と同じ手法により行っている。

定点を設置しているのは、いずれもトラス桁を有する大鳴門橋、櫃石島橋、因島大橋の3橋である。定点設置の例を写真-6に示す。定点は、平成21年3月に、主構の上弦材及び斜材の上面、垂直材および斜材の外面、鋼床版裏面に設けた (図-5)。

(2) 調査結果

定点設置後約1年半経過後の消耗量は表-7のとおりである。

主構部材の中塗り、下塗りの消耗速度は、いずれも面の方向による傾向は見られず、若干のばらつきはあるが平均して6~7 μ m/年程度の消耗速度である。

鋼床版裏面については、中塗り、下塗りともに消耗速度はほぼゼロであり、紫外線等の影響が他の部位に比べて小さいことが考えられる。耐候性の低いエポキシ樹脂塗料が鋼床版裏面では劣化進行速度が非常に遅い結果が得られたことから、鋼床版等の下面の塗膜の寿命は、消耗で説明できない可能性がある。

なお、今回の調査結果は、定点設置直後から短期間のデータであり、また時間と消耗量の関係を線形と仮定して消耗速度を求めているが、今後曲線的に推移する可能性も考えられるため、継続的にデータを蓄積する必要がある。

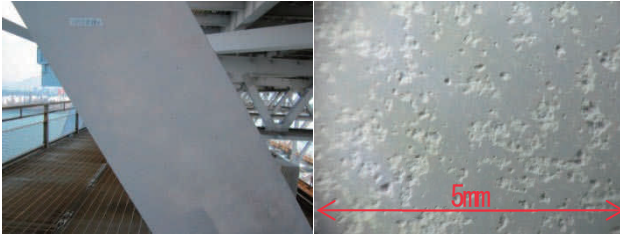
4.4 塗膜劣化の外観状況

表-3において上塗り残存膜厚の変動係数が最も大きい南備讃瀬戸大橋について、塗膜消耗が進行し、下塗りの露出が顕著な区間の塗膜状態を写真-7に示す。南備讃瀬戸大橋では、平成23年度よりこのような状態の区間を対象として塗り替えに着手した。

下塗りが露出する前兆として上塗りの消耗に伴う中塗

りの露出状態がある。外観上、上塗りが薄くなり中塗りが透けたように見える塗膜を高倍率レンズを有するデジタルカメラでミクロに観察したところ、写真-8のように微小に上塗りが欠け落ちたように消失し、中塗りが露出している状態であることが確認された。

前述した劣化予測モデルでは、上塗り塗膜がゼロになるまで消耗した後、中塗りの消耗が始まるモデルとして



〔上塗り消耗状態〕 〔拡大写真〕

写真-8 中塗り塗膜の露出状況

Photo.8 Exposure of middle coat

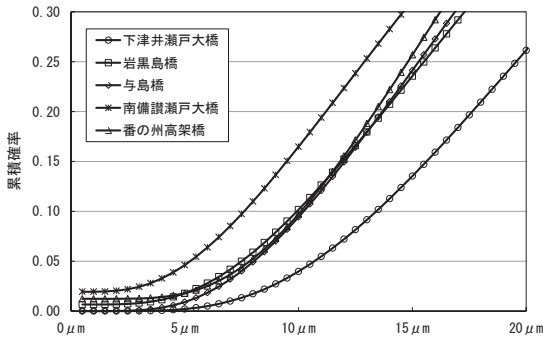


図-6 トラス桁の上塗り残存膜厚の累積確率

Fig.6 Cumulative probability of remaining surface coat on truss girder

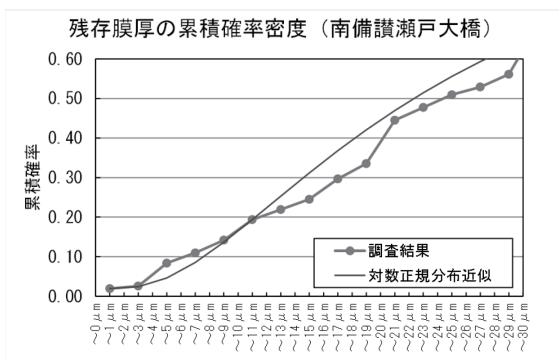


図-7 南備讃瀬戸大橋の上塗り残存膜厚

Fig.7 Remaining surface coat of Minami Bisan-Seto Bridge

表-8 中塗り・下塗りの露出状態 (南備讃瀬戸大橋)

Table 8 Exposure status of middle coat and under coat

使用データ	4年後		10年後	
	上塗り消失	割合	上塗り消失	割合
調査結果	膜厚3 μ m以下	2.6%	膜厚7 μ m以下	11.0%
対数正規分布近似		2.4%		8.5%

10年後	
中塗り露出	下塗り露出
8.4%	2.6%
6.1%	2.4%

おり、上塗り膜厚が小さくなり微細な剥がれが生じる過程を想定していないため、通常の点検において中塗りの露出に注視し、塗り替えが遅れることがないように努める必要がある。

5. 旧塗装仕様の耐久性の評価

5.1 トラス構造

本四連絡橋のトラス形式の桁は、いずれも上路鋼床版を有している。鋼床版の裏面は、4.2 (3) 及び4.3 (2) に示したように、塗膜消耗の進行速度は遅いと考えられ、現在実施している瀬戸大橋の塗替塗装では、鋼床版最外縁の床桁周りを除く部分の塗替塗装を相対的に先送りし、塗膜劣化進行が早いトラス桁部材を先行して塗り替えることとした。

トラス桁部材については、橋梁単位で劣化進行の違いを検討した。表-3の特性値を基に、瀬戸大橋(調査対象5橋梁)の上塗り残存膜厚の累積確率を算出したものが図-6であり、曲線がグラフの左上に位置するほど膜厚は薄い。南備讃瀬戸大橋の膜厚が相対的に小さく、この橋梁の塗膜消耗が最も早く進行するものと考えられる。

南備讃瀬戸大橋を例に、10年後の状態を推測してみる。

表-6を参考に、上塗り塗料の消耗速度を0.7 μ m/年とすると(消耗速度はサンプル数が少ないため、平均値を用いた)、10年間で7 μ m以下の塗膜が消失する。また、表-3を参考に中塗り塗料の残存膜厚を40 μ m、表-7より消耗速度を7 μ m/年とすると、中塗り塗膜は約6年間で消失することから、4年後に上塗りが消失している部分は10年後に中塗り塗膜も消失し、下塗り塗膜が露出した状態となる。図-7の残存膜厚分布に対し、前述した消耗過程を考えると、10年後の塗膜の状態は表-8の状態と試算される。瀬戸大橋に他橋梁を含めて同様の試算を行い、合理的な塗替時期の検討を実施しているところである。

なお、鋼床版裏面のように消耗速度が遅い場合、塗替方法や塗替実施の判断は、他の塗膜劣化形態も想定する必要がある。これまでの点検結果から、鋼床版裏面が無機ジンクリッチペイント層からの剥離が複数の橋梁で確認されているが、小規模であり、現状では、通常の点検及び適宜、局部補修塗装を行うことで対応可能と考えている。

5.2 箱桁構造

箱桁形式の橋梁について、表-3の特性値を基に上塗り残存膜厚の累積確率を算出したものが図-8である。

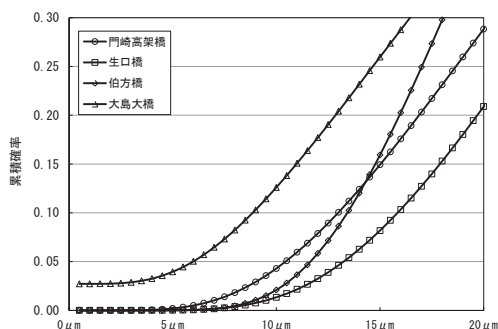


図-8 箱桁の残存膜厚の上塗り累積確率

Fig.8 Cumulative probability of remaining surface coat on box girder

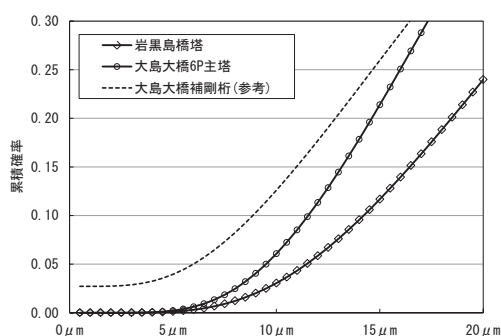


図-9 塔の残存膜厚の上塗り累積確率

Fig.9 Cumulative probability of remaining surface coat on tower

供用後の経過年数が瀬戸大橋とほぼ同じ大島大橋の残存膜厚が相対的に薄い。その他の橋梁はいずれも10 μ m以下の累積確率が0.05未満であり、また箱桁形式は日照条件が厳しい面が限定されることなどから、トラス桁に比べ塗膜寿命が長いと考えられる。

なお、大島大橋の残存膜厚調査では、斜ウェブ（下面）のみで残存膜厚ゼロの箇所が数箇所確認されていることから、塗膜消耗は紫外線の影響以外の要素が寄与することも予想される。

5.3 塔構造

塔は、桁に比べて残存膜厚が大きい。表-3に示すように、生口橋の塔及び大島大橋5P主塔は、平均で60 μ m以上残存している。岩黒島橋の塔及び大島大橋6P主塔について、表-3の特性値を基に上塗り残存膜厚の累積確率を算出したものが図-9である。大島大橋6P主塔は相対的に残存膜厚が小さいが、同橋の補剛桁との比較では主塔の膜厚が大きい。

本調査の結果から、塗替塗装は桁を優先・先行させた方がよいという判断になる。

ただし、塔の膜厚調査は、調査できる箇所が限定されるため、膜厚調査結果のみの評価では不十分な可能性があり、通常、実施する塗膜基本点検（目視点検）と合わせて状態を評価していく必要がある。

6. おわりに

平成22年度に実施した膜厚調査は、中長期計画の検証を行うことを目的とし、主に橋単位での全面塗替計画の検討に資する情報としたが、現在塗替塗装を実施中の瀬戸大橋については、鋼床版裏面と補剛桁・主桁との間で劣化進行速度の違いが確認されたことから、塗替塗装の合理化を図るために鋼床版裏面の塗り替えを相対的に後期にシフトする検討を行った。

平成2年改訂基準を適用した橋梁から上塗りにふっ素樹脂塗料を採用し、平成23年度以降の塗替塗装から更に長期の寿命が期待される高耐久性ふっ素樹脂塗料を適用している。上塗り塗膜の耐久性が伸びるにつれ、塗膜の管理は局部腐食等の変状に対する管理が重要となることから、効率的に補修できる局部補修仕様の検討やアプローチ率の検討も進めているところである。

以上のように、部分塗替塗装や局部補修塗装を効率よく採用し、橋梁全体の塗膜の状態を均一化することにより、長期に塗膜を維持することができ、ライフサイクルコストの削減にもつながると考えている。

今回報告したデータは、大きな構造単位の劣化予測に用いることはできるが、橋の細部における塗膜劣化進行のばらつきまで予測するのは難しいことから、橋ごとの塗替着手の判断や塗替実施計画の策定には、別途、目視レベルの調査も実施する必要がある。今後、より合理的な塗替塗装の実施を目指し、目視レベルの調査の結果を経年的に整理・保存し、評価する手法を検討する必要がある。

また、定点塗膜調査において実施する消耗量調査は、調査数が少ないことが課題となっている。現行の調査方法は、現場で塗膜を採取してから室内で顕微鏡観察するまでの段取りに時間と費用を要することや、あらかじめ計測地点として保護塗膜を施しておき、比較的長い時間が経過しないと結果が得られないことなどから、得られているデータが少ない状況にある。今後は、必要とする定点数や合理的な単層膜厚の調査手法についても検討していく必要がある。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：鋼橋塗装基準・同解説（案）、pp17、1990.4
- 2) 本州四国連絡高速道路(株)：保全管理要領第2編 2-2 塗替塗装、pp19、2007.6
- 3) 山本紀夫、古家和彦、杉山剛史：因島大橋塗膜調査、本四技報、Vol.16No.61、pp26-33、1992.1
- 4) 石橋清美、大西貴浩：大鳴門橋定点塗膜調査結果の報告、本四技報、Vol.24No.95、pp29-34、2000.12
- 5) 石橋清美、門田整達：供用後15年を経た海峡部長大橋群の塗装の現況、本四技報、Vol.28No.103、pp33-38、2004.9
- 6) 本州四国連絡高速道路(株)：保全管理要領第2編 2-1 定点塗膜調査、pp2-5、2007.6

鋼床版伸縮装置セットボルトの腐食診断手法と 腐食原因の推定

Corrosion diagnosis technique and estimate of the corrosion cause on expansion joint set bolts of steel deck plate

坂出管理センター	橋梁維持第二課長代理	村井俊之 Toshiyuki Murai
坂出管理センター	橋梁維持第二課長	小林克己 Katumi Kobayashi
神戸管理センター (前)坂出管理センター	計画課付 橋梁維持第二課	大爺健司 Kenji Ooya

概要

瀬戸大橋は供用後24年以上が経過し、吊橋3橋(下津井瀬戸大橋、北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋)の鋼床版伸縮装置において、セットボルト部回りの局所的な腐食やさび汁の流出等が鋼床版下面からの目視点検により近年多数報告されている。そこで、平成20年度に鋼床版伸縮装置の開放調査を実施したところ、セットボルトのネジ部に腐食による断面欠損が発見された。このため、平成22・23年度に路面上より非破壊検査及び開放調査・ボルト交換等を実施し、非破壊検査によるセットボルトの腐食診断手法の検証及びセットボルトの腐食原因の推定を目的とした各種の試験を行った。本稿では、非破壊検査の適用性及び腐食原因の推定について報告する。

Seto-Ohashi Bridges including three suspension bridges elapsed 24 years or more after open to traffic. Recently, in the three suspension bridges (Shimotsui-Seto Bridge, Kita Bisan-Seto Bridge, Minami Bisan-Seto Bridge), partial corrosion and rust on the set bolt circumference of expansion joint bolts of the steel deck plate are reported a lot by visual inspection from lower of the deck.

We surveyed the expansion joint set bolts in 2008. As a result, section loss caused by corrosion was discovered at the thread of the set bolts. Therefore, we carried out various nondestructive inspection, opening survey and bolts exchanges in the aim of evaluation of the corrosion diagnosis technique by non-destructive inspection method and estimation of the corrosion cause of the set bolts in 2010 and 2011. This paper reports the applicability of non-destructive inspection method and estimation of the corrosion cause.

1. はじめに

吊橋3橋の鋼床版伸縮装置(写真-1、図-1)において、セットボルト部回りの局所的な腐食が、供用後10年経った頃から徐々に目視点検によって報告され、平成19年度末時点では全部で56格点ある鋼床版伸縮装置の内48%(27格点)で変状が確認された。このため、平成20年度から平成23年度にかけ、北備讃瀬戸大橋で2格点、下津井瀬戸大橋で走行車線1箇所分の開放調査を行った。(格点とは、橋軸方向に設置している伸縮装置の上下線を1本とした箇所数をいう。)

その結果、腐食により断面欠損したボルトが多数確認され、北備讃瀬戸大橋では径22mmのボルトが最少10.3mmまで減肉したボルトも発見されている。また、

鋼床版下面からの目視点検において変状が表れていない下津井瀬戸大橋の鋼床版伸縮装置についても開放調査を行った結果、最少11.9mmまで減肉したボルトが発見されている。

そこで、目視点検で確認出来ないセットボルトの変状について、鋼床版伸縮装置の設置箇所が、海上及び鉄道営業線直上であることを考慮して、路面上から測定を行うことが出来、また、複数の角度が同時に測定可能かつグラデーション表示で判断が容易に出来るフェイズドアレイ超音波探傷法による腐食診断の検証を行った。

また、開放調査により撤去した腐食ボルトを基に、セットボルトの腐食原因の推定を目的としたボルトの性能確認及び断面マクロ・ミクロ組織試験、EPMA分析等を行った。本稿ではそれらの結果について報告する。

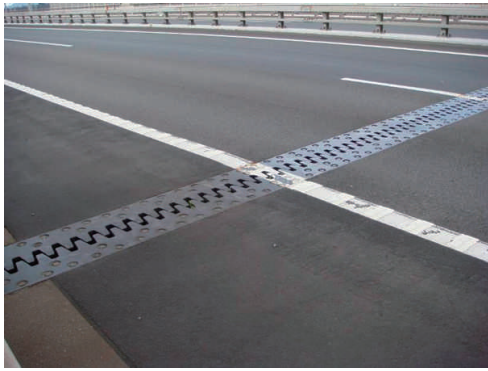


写真-1 鋼床版伸縮装置全景

Photo1 Expansion joint of steel deck plate

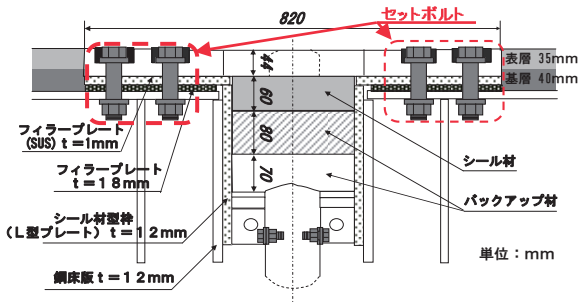


図-1 鋼床版伸縮装置(非排水型)構造図

Fig.1 Structure of expansion joint of steel deck plate (Non-drainage type)

2.2 開放調査

目視点検では判定出来ない伸縮装置内部のボルトの腐食状況確認を目的にH20・H22・H23年度に開放調査(写真-3,4)を行った。

また、写真-5に示すように鋼床版裏面からの変状が全く現れていない個所についても大きく断面欠損しているボルトが数本発見されている。

表-2に示すとおり開放調査での変状率34.5%に対し、表-1に示す目視点検による変状率は6.1%と、大きく差が出る結果となったことから、目視点検では、発見出来ない腐食ボルトが多数存在している可能性が出てきた。

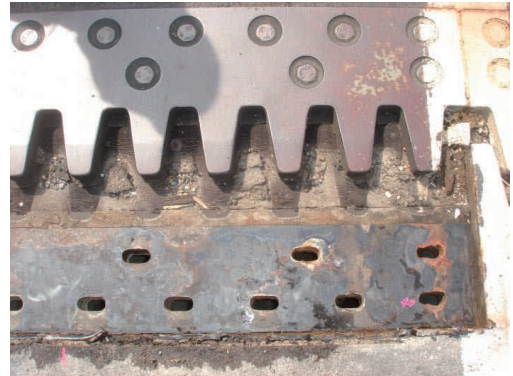


写真-3 フェイスプレート撤去状況

Photo3 Face plate removal situation

2. 目視点検及び開放調査

2.1 目視点検

桁内面作業車及び管理路等より鋼床版裏面を目視点検した結果、伸縮装置セットボルト部にさび汁の流出等の変状(写真-2)が表-1のとおり報告されている。

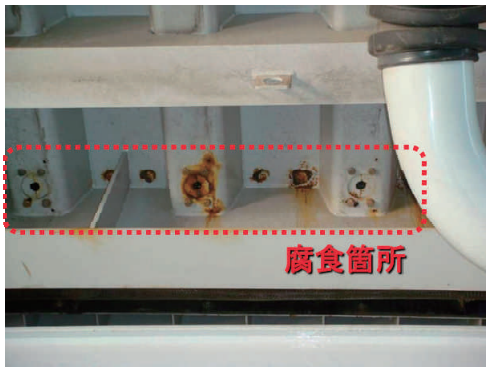


写真-2 鋼床版裏面の錆び汁流出状況

Photo2 Rust juice on lower of the steel deck plate



写真-4 セットボルトの断面欠損状況(1)

Photo4 Section loss situation of set bolts (1)

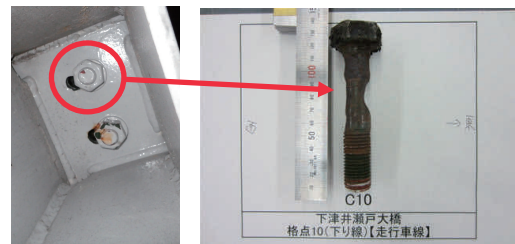


写真-5 セットボルトの断面欠損状況(2)

Photo5 Section loss situation of set bolts (2)

表-1 目視点検による変状率

Table1 Deformation rate by visual inspection

【平成23年度末時点 目視点検による変状率】

変状格点数	34	／	総格点数	56	=	60.7%
変状本数	1,570	／	総本数	25,760	=	6.1%

表-2 開放調査による変状率

Table2 Deformation rate by opening investigation

【平成23年度 開放調査結果】						
※撤去本数:814本						
※径1mm以上欠損したボルト:281本						
断面欠損ボルト本数	281	／	交換ボルト本数	814	=	34.5%

3. 非破壊検査による腐食診断

前項で示したとおり目視点検で確認出来ない、大量にあるセットボルト（460本/格点×56格点=25,760本）の変状について、開放せずに腐食ボルトを把握することが可能か検証するため開放調査に合わせ、非破壊検査(超音波探傷法)による診断を約1.5格点分(814本)について実施した。

3.1 超音波探傷法の手法

今回採用した超音波探傷法の手法については、下記の特徴を有した「フェイズドアレイ法」を用いた。

- ①路面上より測定が可能
- ②一度の測定で複数角度が同時に測定可能。
- ③同じ探触子で自在に角度変更が可能。
- ④出力画面は従来と同様の波形画像に加えてグラデーション表示で判断が容易に行える。

なお、評価方法として「エコーレベルを用いたもの」と「画像読影によるもの」の2つの方法を試みた。

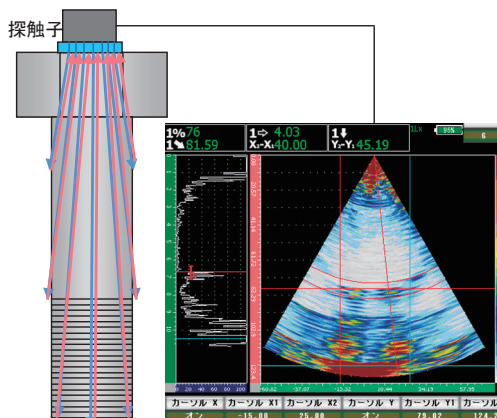


図-2 フェイズドアレイ超音波探傷法概要図
Fig.2 Phased array ultrasonic inspection method

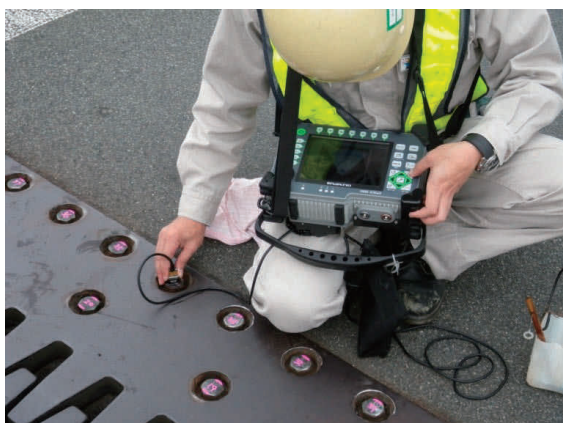


写真-6 フェイズドアレイ超音波探傷法による測定状況
Photo6 Measurement situation by phased array ultrasonic inspection method

3.2 「エコーレベルを用いたボルト腐食評価方法」の適用性

この方法は、ネジ部を着目点とし、減肉箇所の反射エコーレベル（45°ずつ4方向(8面)の平均）と実際に撤去したボルトの残存径から換算式(最少二乗法)を求めボルト径を推定するものであるが、この方法ではH23年度に実際に撤去した腐食ボルト281本/814本に対し、この腐食評価方法で腐食ボルトであると推定されたボルトは239本であり、合致率は85.1%と、腐食ボルトの検出精度が落ちることが判明した。これは、様々な腐食形態(ネジ部以外の腐食)や、ボルトメーカーによるボルト頭部探傷面の状態の違い、ボルト長さの違い等によるものと考えられる。

3.3 「フェイズドアレイ画像読影によるボルトの腐食評価方法」の適用性

この方法は、ボルトの残存径を推定することは出来ないが、フェイズドアレイ画像(グラデーション)の読影により、そのパターンから腐食状態や減肉状態を推測・判定する方法であり、ボルトのネジ部及びボルトの軸部(首下部)全体の腐食状態を判定できるものである。図-3は平成22年度に撤去したボルトにより腐食程度をランク分けしたものである。判定基準は表-3による。

図-4は、平成23年度に撤去したボルトの残存径を判定ランク別に区分したグラフである。

これによると、Aランク(健全ボルト)はほぼ確実に検出されており、B→Eランク(腐食ボルト)になるに従い検出したボルト径が小さくなる傾向を示し、腐食減肉相当のレベルとなっている。結果として、ボルトの残存径が大きいものも腐食ボルトとして判定しているものもあるが、腐食ボルトを確実に検出しており、安全サイドの判定であると言える。

なお、H23年度に実際に撤去した腐食ボルト281本/814本に対し、この腐食評価方法で腐食ボルトであると判定されたボルトは279本であり、合致率は99.3%と、精度が高いことが判明した。また、ボルト1本に対し残存最少径1方向の画像データ保存作業のみで行えることから非破壊検査時間及び解析時間の短縮が図られ、本線交通規制日数も減らすことができる「フェイズドアレイ画像読影によるボルトの腐食評価方法」は、「エコーレベルを用いたボルト腐食評価方法」に比べ、腐食ボルトの検出に有効であり、適用性が高く、約半分の費用で測定できることが確認できた。

表-3 フェイズドアレイ画像判定基準
Table3 Image judgment criteria of phased array ultrasonic inspection

A: 健全
B: 僅かな腐食、減肉があるレベル
C: 部分的な腐食、減肉があるレベル
D: 大部分が腐食、減肉があるレベル
E: 全体的な腐食、減肉があるレベル

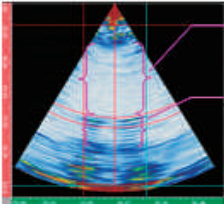

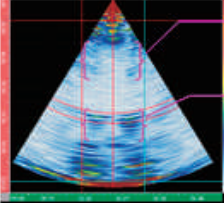

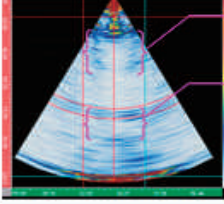

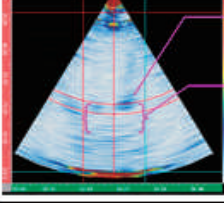

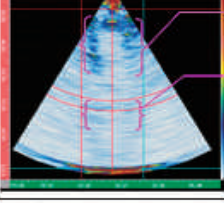

判定ランク	フェイズドアレイ画像の代表例	ボルト写真
全体:A 軸部:A ネジ部:A	 <p>軸部に腐食からのエコーが無い ネジ部に正常なエコーがある</p>	 <p>北備讀 K23 上り ボルトD70</p>
全体:B 軸部:B ネジ部:A	 <p>軸部に腐食からの弱いエコーがある ネジ部に正常なエコーがある</p>	 <p>北備讀 K23 上り ボルトC15</p>
全体:C 軸部:C ネジ部:C	 <p>軸部に腐食からのやや強いエコーがある ネジ部のエコーがやや弱くなっている</p>	 <p>北備讀 K23 上り ボルトC4</p>
全体:D 軸部:C ネジ部:D	 <p>軸部に腐食からのやや強いエコーがある ネジ部のエコーが弱くなっている</p>	 <p>北備讀 K23 上り ボルトD49</p>
全体:E 軸部:E ネジ部:E	 <p>軸部に腐食からの強いエコーがある ネジ部のエコーが消失している</p>	 <p>北備讀 K23 上り ボルトC30</p>

図-3 フェイズドアレイ画像の読影による判定例

Fig.3 Judgment example by reading of phased array image

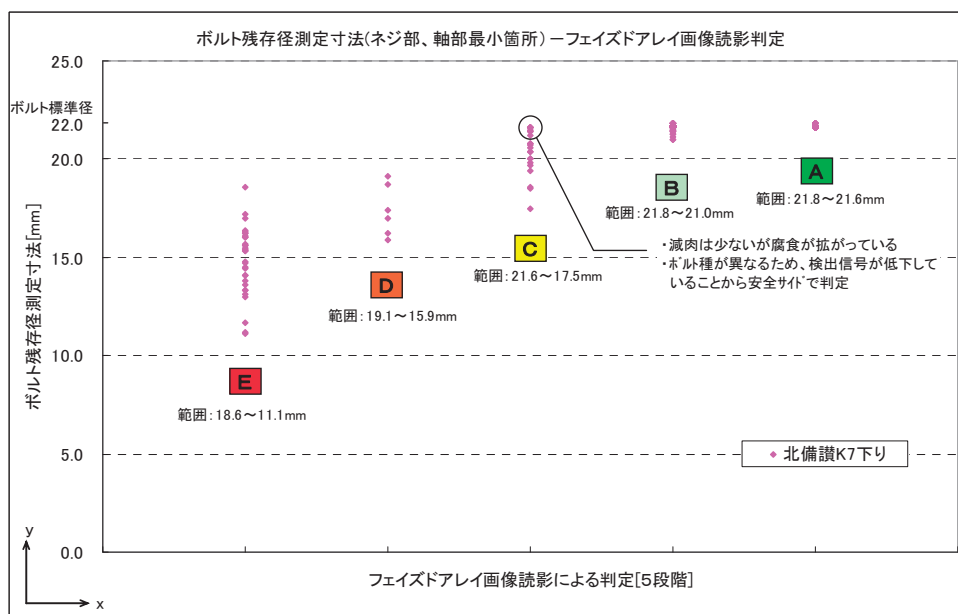


図-4 フェイズドアレイ画像読影によるボルト残存径の比較分布図

Fig.4 Comparison distribution map of bolt residual diameter by reading of phased array image

4. 腐食原因の推定

4.1 腐食原因の推定を目的とした各種試験

腐食原因の推定を目的に下津井瀬戸大橋及び北備讃瀬戸大橋において撤去した健全ボルト及び腐食ボルトを数本使用し、性能確認(引張試験)及びボルト損傷原因の検討(外観及び寸法測定、断面マクロ・マイクロ組織試験、付着スケールのEPMA分析)を行った。

(1) 引張試験

試験は、撤去ボルトのままで行うものと、引張試験片(平行部:φ8mm)に加工して行うものにと選別して、それぞれ引張試験を行った。その結果、写真-7に示すように撤去ボルトの状態で行ったものの破断位置は、健全ボルトではネジ部の谷部、腐食ボルトでは減肉部であった。健全ボルトは最大荷重を満足していたが、腐食ボルトはいずれも下回っていた。これは腐食ボルトが減肉により当初のボルト断面積を下回ったために生じたものと考えられる。

なお、いずれの試験片とも破断面には割れを起点とした破面様相は見られなかった。

また、写真-8に示すようにφ8mm試験片に加工したものの試験結果では、いずれも標点間以内で破断しており、破断面もカップ&コーンの様相で、一般的な引張試験片の破断様相を示した。また、健全ボルトと腐食ボルトの引張り強さに大差は見られなかった。ただし、一部のボルトで伸びが規格値をやや下回っていた。試験結果を表-4に示す。

以上より、いずれの試験片とも規格値をおおむね満足していることから、経年使用による材質の劣化は認められないものと判断できる。

表-4 引張試験結果

Table4 Tensile test result

種別	格点	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	試験片形状
健全ボルト	NBB, K23	-	* 326	-	-	撤去ボルト のまま
	NBB, K23	-	* 323	-	-	
	SB, K10	-	* 329	-	-	
腐食ボルト	SB, K10	-	* 220	-	-	
	SB, K10	-	* 254	-	-	
	NBB, K23	-	* 226	-	-	
M22 F10T		-	* ≥303	-	-	規格値
健全ボルト	SB, K10	1,038	1,102	17	68	φ8試験片
	NBB, K7	1,033	1,109	12	67	
	NBB, K7	1,034	1,107	17	67	
腐食ボルト	NBB, K23	1,034	1,112	13	67	
	NBB, K7	1,024	1,091	15	68	
	NBB, K7	1,015	1,090	16	68	
M22 F10T		≥900	1,000~1,200	≥14	≥40	規格値

注: *は最大荷重(N)を示す。

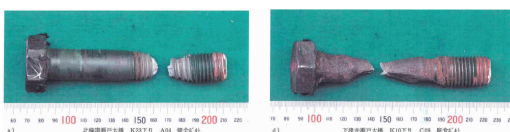


写真-7 撤去ボルトの破断状況
Photo7 Break situation of the removal bolt



写真-8 φ8mm試験片ボルトの破断状況
Photo8 Break situation of φ8mm specimen

(2) 外観及び寸法測定

写真-9に示すように、外観及び顕微鏡観察では腐食ボルトの減肉部に腐食スケールが付着しており摩耗や摺動による損傷痕は認められなかった。また、平行部や減肉部に割れも認められなかった。

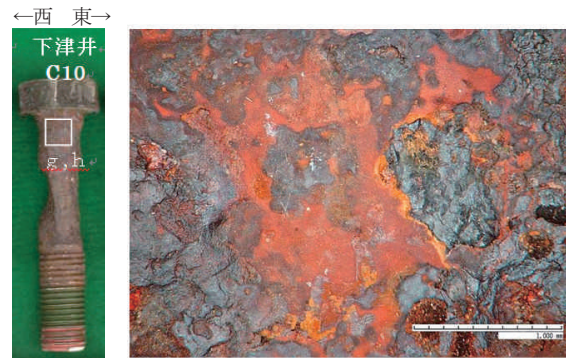


写真-9 顕微鏡による表面様相
Photo9 Surface aspect with microscope

(3) 断面マクロ・マイクロ組織試験

ネジ部の腐食ボルト2本及び首下部の腐食ボルト2本を使用して、断面マクロ・マイクロ組織試験を行った結果は以下のとおりであった。

- ①腐食部の表面近傍に割れは見られず素材は均一なマクロ組織であった。
- ②いずれの供試体とも全面腐食様相であり、表面にはスケールの付着が見られるが局所的な孔食や割れは見られない。
- ③いずれの供試体とも表面には塑性変形域は見られず摩耗や摺動による痕跡は見られない。
- ④いずれの供試体とも均一なベイナイト的組織である。

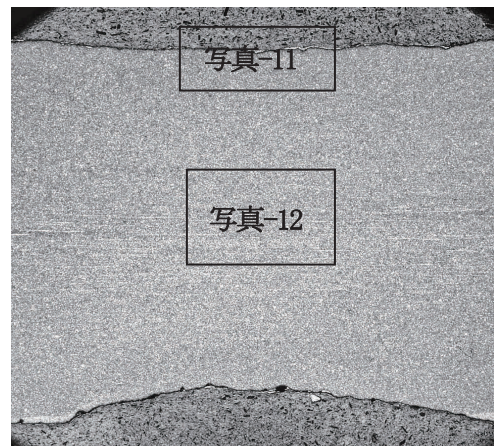


写真-10 最小断面マクロ組織
Photo10 Smallest section macrostructure

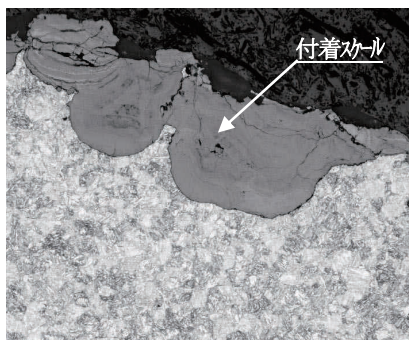


写真-11 腐食部のマイクロ様相

Photo11 Micro aspect of corrosion part



写真-12 断面マイクロ組織 (ベイト組織)

Photo12 Sectional micro organization (bainite structure)

(4) 付着スケールのEPMA分析

北備讃瀬戸大橋の腐食ボルト1本を使用し、スケール部のEPMA分析(定性分析)を行った。その結果、素材成分以外に多量のO(酸素)、少量のCr(クロム)、微量のMn(マンガン)、Si(ケイ素)、Ca(カルシウム)、Cl(塩素)、Al(アルミニウム)、C(炭素)が検出され、また、面分析では、スケール部分には主にFe(鉄)、O(酸素)が分布しておりCa(カルシウム)も全体に分布、スケール部分にはわずかではあるがS(硫黄)も分布していた。

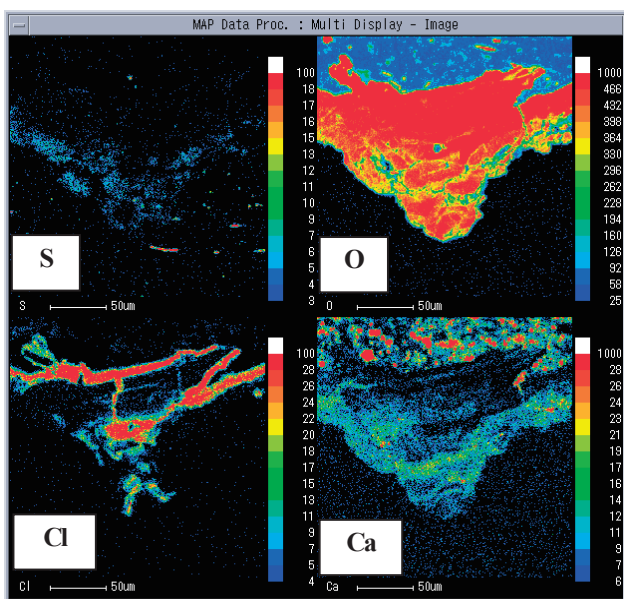


写真-13 面分析結果

Photo13 Aspect analysis by EPMA

4.2 腐食原因の推定

以上の試験結果から、ボルトの組織に問題はなく、表面域には摩耗痕や割れも見られないことが分かった。一方、EPMA分析結果から、本ボルトの腐食には塩化カルシウム (CaCl₂) や硫黄酸化物 (SO_x) の関与も考えられた。しかし、これらの腐食因子の量は微量で大気雰囲気中のもと考えられることから、ボルトの主な腐食原因としては、雨水等が伸縮装置のフェイスプレート裏面からボルト穴に浸入し、防せいボルトの表面傷などにより防せい機能が低下している部分で腐食を進行させたものと考えられる。

なお、フェイスプレートの下に調整用のフィラープレート(SUS 304 t=1mm)が存在するため、異種金属接触腐食の可能性も否定はできないが、SUS板の上下の鋼板(SM41A)や鋼床版(SS41)側では大きな腐食が見られないことから、この可能性は低いと考えられる。

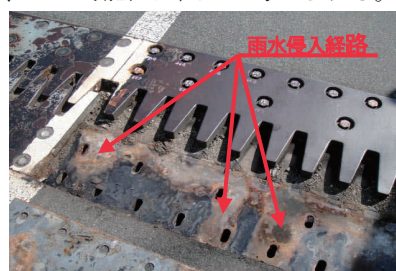


写真-14 フェイスプレート裏面状況

Photo14 Back side situation of face plate

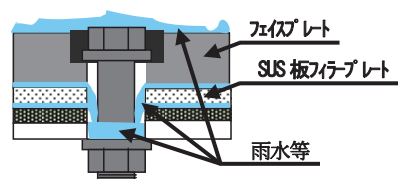


図-5 雨水等浸入経路断面図

Fig.5 Invasion route of rainwater

5. おわりに

瀬戸大橋の鋼床版伸縮装置は、海上及び鉄道営業線直上にあることから、ボルトの腐食(減肉)による破断・落下は絶対に避けなければならない。これまでの開放調査の結果から、腐食ボルトは全体ボルト数の約65%程度(うち1mm以上の断面欠損ボルト約35%)存在する可能性があり、また、計算上の破断径(12mm以下)に達しているボルトも約1%程度想定されている。

しかし、対象箇所数が多く、予算面等から早期の補修は難しいため、応急対策としてセットボルト落下防止用仮設ネットを先行して設置するとともに、今後は安全性・効率性・経済性を考慮した長期補修計画を構築していくこととしている。

参考文献

- 1) 本四高速：平成23年度坂出管内長大橋機能保全業務委託(鋼床版伸縮装置機能保全)報告書、2012.3

来島海峡大橋ケーブル送気設備の改善と効果

Improvement and Effect of Dry-air injection system for main cables of the Kurushima - Kaikyo Bridges

しまなみ今治管理センター 施設課

松 葉 真 人

Masato Matsuba

しまなみ今治管理センター 施設課長代理

小 野 祥 史

Yoshifumi Ono

概 要

来島海峡大橋では、平成11年の供用開始時からケーブル送気設備を設置し24時間連続運転しているが、夏期の相対湿度が管理基準値を超過していた。このため、既設の乾式除湿機による送気設備に、高温多湿の環境で除湿効果が大きい湿式除湿機を追加設置した結果、相対湿度は年間を通じて管理基準値を満足することができた。

また、送気設備の最適な運転制御方法として、既設の乾式除湿機の再生ヒータの加熱温度を140℃から70℃に設定した結果、管理基準値を概ね満足させつつ使用電力量を約46%削減することができた。

本稿は、既設の送気設備を活用して効率的かつ経済的に除湿能力を向上させる方法として湿式除湿機を追加設置による改善方法とその効果、ならびに最適な運転制御方法の取り組みとその効果について報告するものである。

The dry - air injection system for main cables of the Kurushima-Kaikyo Bridges has been under operation 24 hours since the opening in 1999. Relative humidity used to be over the criteria-of-control humidity in summer period. Therefore, we have added the wet type dehumidifier with high dehumidification effect under the environment of heat and high humidity. As a result, relative humidity has become always under the criteria-of- control humidity.

As the optimum operation control method, we have reset heat temperature of the re-heater of the existing dry type humidifier in the range from 70℃ to 140℃. It has led to satisfy the criteria-of-control humidity and reduce about 46 % of electricity consumption.

This paper describes improvement and effect by extension of the wet type dehumidifier as a method to improve dehumidification capability effectively and economically using the existing dry-air injection system, and also the optimum operation control method and its effect.

1. 来島海峡大橋送気乾燥システム

1.1 送気乾燥システムの概要

来島海峡大橋のケーブル送気乾燥システム（以下「送気乾燥システム」という。）は、図-1、2に示すように各主塔の中間水平材に設置した送気設備で塔内の空気をフィルタユニット吸込口から吸い込み、除湿機ユニットを通過して精製した乾燥空気を送気カバーから主ケーブル内に送気し、主ケーブル内の相対湿度を管理基準値¹⁾以下に保つことで防せいを図っている。

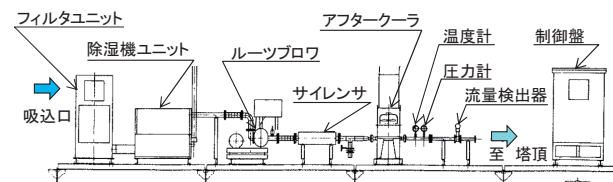


図-1 送気設備
Fig.1 Dehumidification plant

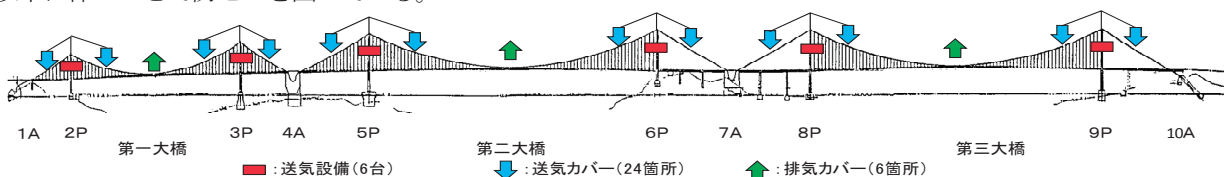


図-2 来島海峡大橋送気乾燥システム概略配置図

Fig.2 Layout of the dry - air injection system for the Kurushima - Kaikyo Bridges

乾燥空気は、除湿機ユニット内に組み込んだシリカゲルロータ（以下「ロータ」という。）を用いた乾式除湿機で精製している。ロータはシリカゲルをコルゲートハニカム上に添着した素材を円筒形に成形したもので、断面を処理ゾーンと再生ゾーンに分けて以下に示す①～⑤のサイクルを繰り返すことで乾燥空気を連続的かつ安定的に精製している（図-3、写真-1、2）。

- ①外気を処理ファンでロータの処理ゾーンを通過（処理）させ乾燥空気を精製する。
- ②乾燥空気をルーツブロワで主ケーブルに送気する。
- ③処理ゾーンで湿分を吸着した箇所は、ロータを回転させ再生ゾーンに移動させる。
- ④再生ヒータで140℃に加熱した熱風を当て、湿分を吸着した箇所を乾燥（再生）させる。
- ⑤乾燥させた箇所はロータを回転させ再び処理ゾーンに移動させる。

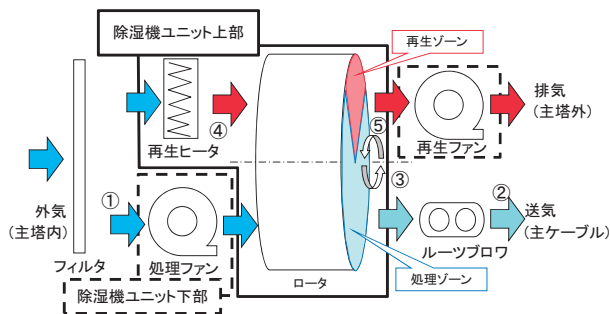


図-3 乾式除湿機の除湿方法

Fig.3 Dehumidification system of the dry type dehumidifier

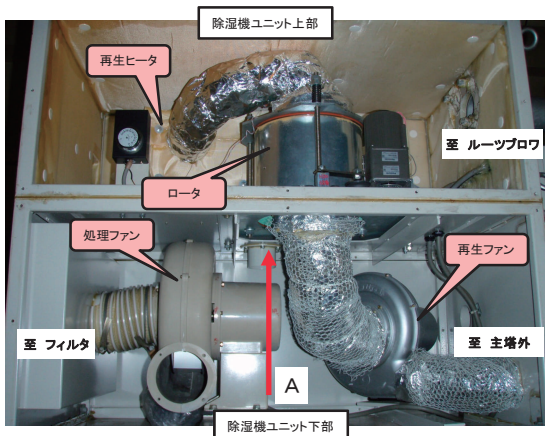


写真-1 除湿機ユニットの内部

Photo 1 Inside the dehumidifier unit

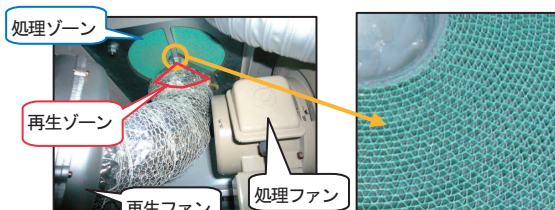


写真-2 ロータ入口(写真-1のA矢視)

Photo 2 Mouth of the rotor (Arrow sign shows A at Photo-1)

1.2 送気乾燥システムの現況と課題

第一大橋から第三大橋までの主ケーブル内の温湿度環境を把握するため、第三大橋北側主ケーブルの中央径間中央から10Aまでの間を温湿度データの計測範囲の代表区間として温湿度自動計測設備により連続計測していたが、平成11年の供用開始当初から高温多湿の夏期には相対湿度が60%RH程度まで上昇する傾向が確認された（図-4）。

また、第一大橋、第二大橋の主ケーブル内の温湿度は、供用開始時においては1～2回/年の頻度で手動計測していたが、

- ①各橋梁の送気延長の違いにより主ケーブル内への湿分浸水量等が異なる。
- ②手動計測では多湿度となる雨天時の温湿度が計測できない。

等の管理上の課題が生じたため平成17年に温湿度自動計測設備を設置した。その結果、第一大橋、第二大橋においても第三大橋と同様に夏期の相対湿度が60%RH程度まで上昇する傾向が確認された。

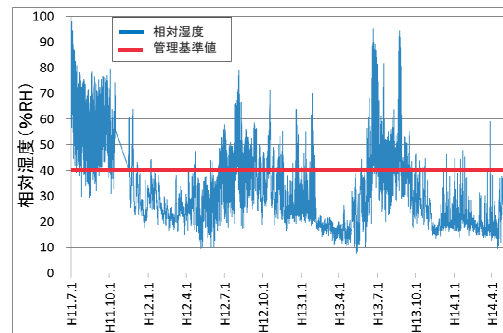


図-4 排気カバー部の相対湿度推移(第三大橋中央径間)

Fig.4 Transition of relative humidity at the air exhaust cover
(In the center span of the Third Kurushima-Kaikyo Br.)

夏期の相対湿度上昇の原因を特定するため、第二大橋6Pの送気設備においてロータの除湿能力を調査した。その結果、ロータの除湿量（ロータ通過前後の絶対湿度の差）が供用開始時の要求性能（図中のメーカー性能曲線）に比べ低下していることが判明した（図-5）。

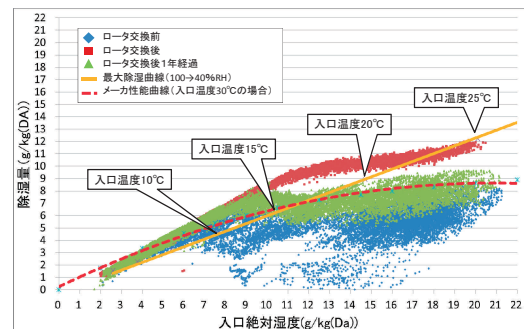


図-5 ロータの除湿性能(第二大橋6P)

Fig.5 Dehumidification capability of the rotor
(The Second Kurushima-Kaikyo Br. 6P)

所要の除湿能力を得るため、平成20年8月にロータを新品に交換したところ、除湿量が約3g/kg(DA)増加し（乾燥空気1kgに含まれる水分量が3g増加）、除湿能力は供用開始時の要求能力以上となった。しかし、その僅か1年後には除湿能力はメーカー性能曲線近傍に推移し、送気カバー部での相対湿度は約60%RHまで上昇した（図-6）。

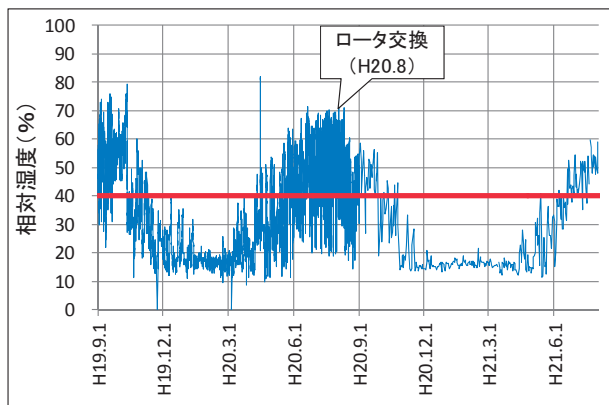


図-6 送気カバー部の相対湿度推移(第三大橋中央径間)

Fig.6 Transition of relative humidity at the air injection cover
(In the center span of the Third Kurushima-Kaikyo Br.)

夏期の相対湿度上昇の原因がロータの除湿能力の低下ではなかったことから、来島海峡大橋の送気乾燥システムにおける供用開始時の設計除湿能力を調査したところ、表-1に示すように除湿能力は、除湿後の温度20°Cにおいて相対湿度が年間平均で20%RHとなるように設計しており、7、8月の夏期においては相対湿度が約60%RHまで上昇することを許容していた。

表-1 月別除湿能力²⁾

Table 1 Monthly dehumidification capability

月	松山市		除湿後(設計値)	
	外気 (月平均)		20°C 換算	入口温度 換算
	温度 (°C)	湿度 (%RH)	湿度 (%RH)	湿度 (%RH)
1	5.8	63	1	2
2	6	63	1	2
3	9.1	64	2	4
4	14.3	64	7	10
5	18.5	66	15	17
6	22.3	73	34	29
7	26.5	73	59	40
8	27.3	71	62	40
9	23.7	72	40	32
10	18.2	69	17	19
11	13	67	6	9
12	8.2	64	1	3
平均	16.1	67.4	20	17

送気乾燥システムにより防止しようとしている主ケーブルの素線の腐食の進行は、主ケーブル内の環境の相対湿度により異なり、一般に金属材料の臨界湿度は約60%RHであり、これ以下であれば腐食はほとんど進行しないといわれている。このため、供用開始時の除湿能力は、塔内から吸い込んだ空気を相対湿度約60%RH以下に抑制することで防せいするよう設計していた。

除湿後の相対湿度を除湿後の温度20°Cの代わりに各月の月平均の外気温度で換算すると、7、8月の月平均の相対湿度は約40%RHになり、ほぼ現行の管理基準値となるが、外気温度は月平均温度より高いときもあれば低いときもあるので、常時40%RH以下となる能力を有していないことが判明した。

よって、年間を通じて除湿後の相対湿度を現行の管理基準値以下にするためには新たな方法で除湿能力を改善する必要が生じた。

2. 除湿能力の改善方法

2.1 除湿方式の概要

本四連絡橋の吊橋の主ケーブルの防せいを目的とする送気乾燥システムやスプレー室除湿設備の除湿方式には、乾式除湿と湿式除湿とがある。乾式除湿は、ロータで空気中の水分を吸着して除湿する方式で、一般に除湿前の温度が低温の場合に除湿効果が期待できるものである。一方、湿式除湿は、ヒートポンプ等で冷媒を冷却・加熱し、空気中の水分を結露させて除湿する方式で、一般に除湿前の温度が高温の場合に除湿効果が期待できるものである。

来島海峡大橋の送気乾燥システムの除湿方式は、ロータを用いた乾式除湿であり、既設の除湿能力を向上させるための条件を整理すると次のとおりである。

- ①既設の送気設備においては、高温多湿の夏期は除湿能力が不足している。このため、夏期の相対湿度を下げ、現行の管理基準値以下にする。
- ②既設の送気設備を有効に活用し、効率的かつ経済的に除湿能力を向上させる。

以上の条件を満足させるため、第三大橋8P、9Pで試行した湿式除湿機（以下「プレクーリング設備」という。）の追加設置による除湿能力の向上対策として、第一大橋2P、3P及び第二大橋5P、6Pの送気設備にプレクーリング設備を追加設置したところ、年間を通じて主ケーブル内の相対湿度を管理基準値以下にすることができた。

以下にプレクーリング設備の追加設置による除湿能力の改善方法について第二大橋6Pの施工事例をもとに報告する。

2.2 改善方法の選定

図-7は、第二大橋6P送気設備においてロータ交換後1年が経過した時の除湿量をプロットしたものである。

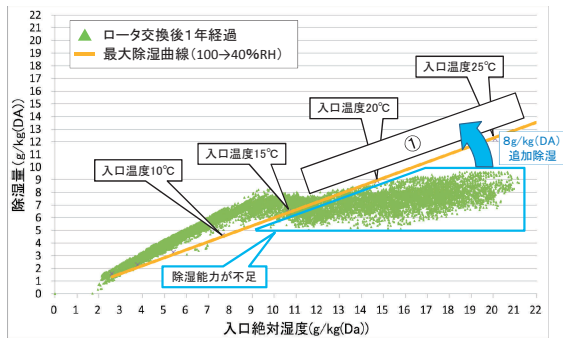


図-7 ロータの除湿性能(第二大橋6P)
Fig.7 Dehumidification capability of the rotor
(The Second Kurushima – Kaikyo Br. 6P)

図中の最大除湿曲線は、各温度における相対湿度を100%RHから40%RHに除湿するために必要な除湿量を示したものである。既設の乾式除湿機で除湿能力不足となっているのは、入口絶対湿度が約10g/kg(DA)以上の範囲であり、この範囲の除湿能力が最大除湿曲線以上の除湿量(図-7の①の範囲)となれば、各温度においても除湿後の相対湿度は40%RH以下を満足することとなる。

既設の乾式除湿機は、入口空気の温度が約15°C以上、絶対湿度が約10g/kg(DA)以上となった場合、精製後の乾燥空気の相対湿度は管理基準値を満足することができない。このような多湿度の空気を効率的に8g/kg(DA)以上追加除湿するための方法は、次の2点が考えられる。

- ①既設の乾式除湿機の除湿能力を向上させる方法
- ②プレクーリング設備を追加設置させる方法

両者のエネルギー消費量を比較した結果、後者の方がエネルギー消費量を約1/10に抑えることができる(表-2)。よって、既設の乾式除湿機にプレクーリング設備を追加設置することとした。

表-2 エネルギー消費量の比較

Table 2 Comparison of energy consumption

除湿方式	除湿概要	エネルギー消費量
乾式	熱風で乾燥させたロータ内に空気を通過させ除湿する	ヒータ消費電力÷追加除湿量 = 4.5kW ÷ 8g/kg(DA) ≒ 0.56kW/(g/kg(DA))
湿式	ヒートポンプ等により、冷却したフィンに空気を通過・結露させ除湿する	冷房消費電力÷追加除湿量 = 0.51kW ÷ 8g/kg(DA) ≒ 0.06kW/(g/kg(DA)) ※冷房能力2.5kWの場合

2.3 プレクーリング設備の除湿方法

プレクーリング設備は、図-8に示すように室内機、室外機、冷媒管及び電源設備等から構成され、室内機において冷却したフィンに湿った空気を通過・結露させて乾燥空気を精製するものである。

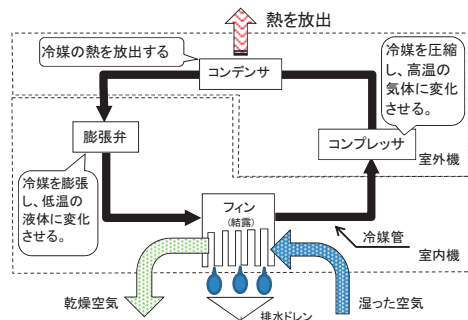


図-8 プレクーリング設備の除湿方法
Fig.8 Dehumidification method of the pre-cooling facility

室内機では、膨張弁で冷媒を膨張させフィンを冷却し、フィンの間に湿った空気を通過させることで空気中の水分がフィン表面に結露し、乾燥空気が精製される。

室外機では、フィンで蒸発して気体となった冷媒をコンプレッサーで圧縮させ、コンデンサで熱を放出・凝縮して液体となった冷媒を室内機に循環させる。このサイクルを繰り返すことで連続的に乾燥空気を精製することができる。

2.4 プレクーリング設備の能力設定

プレクーリング設備を追加設置する場合、冷却能力の設定と排水ドレンの処理方法を検討する必要がある。前述の図-7に示すように既設の乾式除湿機では外気温度約15°C以上、絶対湿度約10g/kg(DA)以上になると管理基準値を満足できない。このことから冷却能力の設定に必要な除湿量は、平成20年に計測した主塔内の温湿度データをもとに、乾式除湿機で除湿できる温湿度条件まで除湿した場合の約8.08g/kg(DA)に設定した。冷却能力は、前述の除湿量、既設処理ファンの風量および空調機メーカーのカタログ値等より約2.5kWを選定した。

また、室内機のフィン表面に結露する水分量は、最大約1.8L/hr発生する。この水分を主塔の外へ排水するため、送気設備が設置されている中間水平材から下部水平材の水抜孔まで排水ドレンを敷設した(図-9)。なお、排水ドレンは、①材質を樹脂製とし鋼管に比べ材料費と施工費の削減を図るとともに、②外周をスパイラル状に補強材が取り付けられたホースを選定し、樹脂製に伴う自重等による断面の閉塞を防止した。

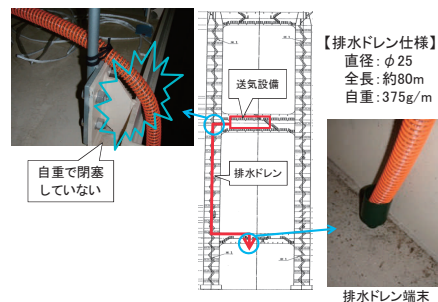


図-9 排水ドレンの敷設(第二大橋6P)

Fig.9 Installation of the drain(The Second Kurushima – Kaikyo Br. 6P)

2.5 プレクーリング設備の施工

来島海峡大橋では、第三大橋9Pにおいて平成14年3月に既設の送気設備にプレクーリング設備（冷却能力2.2kW）を追加設置し、夏期の相対湿度上昇の抑制対策を試行した結果、図-10に示すように排気カバー部の相対湿度は臨界湿度の60%RH以下にすることができたが、以下の改善項目が指摘された。

- ①室内機からの冷却された空気によりフィルタユニット外面が結露する。
- ②除湿機ユニットでは一度冷却した空気を再度140℃まで加熱する必要が生じた。
- ③排気カバー部の相対湿度は夏期において管理基準値以下に推移していない。

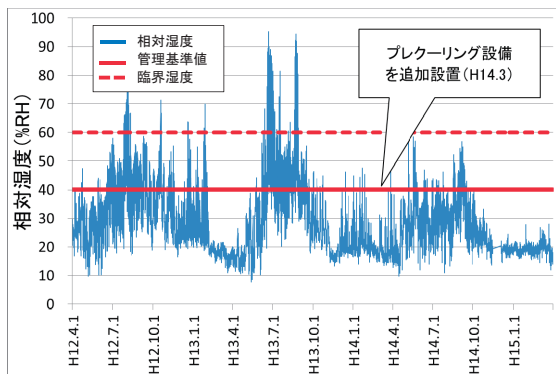


図-10 プレクーリング設備増設前後の相対湿度の推移
(第三大橋中央径間)

Fig.10 Transition of relative humidity before and after extension of the pre-cooling facility
(In the center span of The Third Kurushima-Kaikyo Br.)

このため、第二大橋6Pでは第三大橋9Pでの改善項目を踏まえ室内機を除湿機ユニット下部に追加設置し、次のような改善を図った（図-11、12、写真-3）。

- ①フィルタユニットの結露を防止
- ②余分な再生ヒータ負荷を低減
- ③密閉空間内での循環除湿による除湿効率の向上

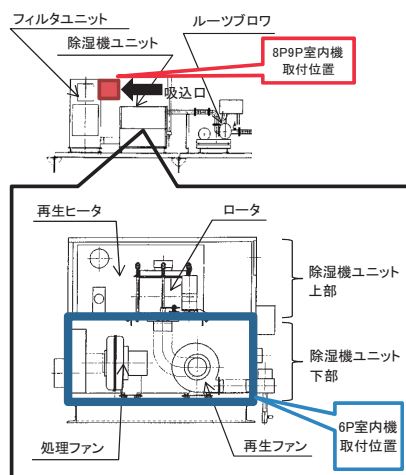


図-11 室内機の取付位置の差異

Fig.11 Difference of installation points of the interior units

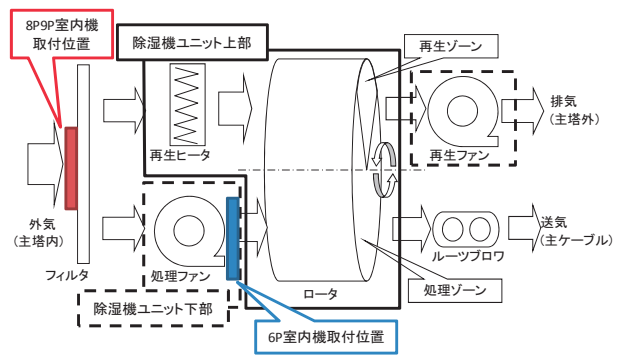


図-12 除湿方法の差異

Fig.12 Difference of dehumidification method



写真-3 室内機の増設(第二大橋6P)
Photo 3 Extension of the interior unit
(The Second Kurushima-Kaikyo Br. 6P)

3. プレクーリング設備の追加設置による効果

来島海峡大橋の送気設備では、平成14年3月に第三大橋9Pの送気設備にプレクーリング設備を追加設置して以降、除湿能力を評価しながら、順次、各主塔の送気設備にプレクーリング設備を追加設置した結果、以下の効果が確認できた。

- ①夏期の相対湿度は、送気カバー部で20%RH以下（図-13）、排気カバー部で30%RH以下（図-14）となり、管理基準値以下に推移した。なお、この結果は、プレクーリング設備の追加設置と並行して実施しているケーブルバンド部のシール補修による気密化の効果も現れていると考えられる。

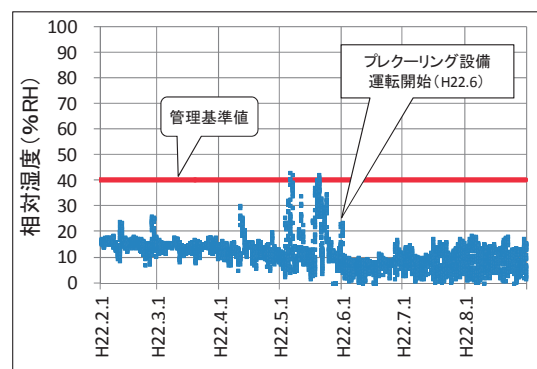


図-13 送気カバー部の相対湿度推移(第二大橋6P中央径間)
Fig.13 Transition of relative humidity at the dry-air injection cover
(In the center span of the Second Kurushima-Kaikyo Br. 6P)

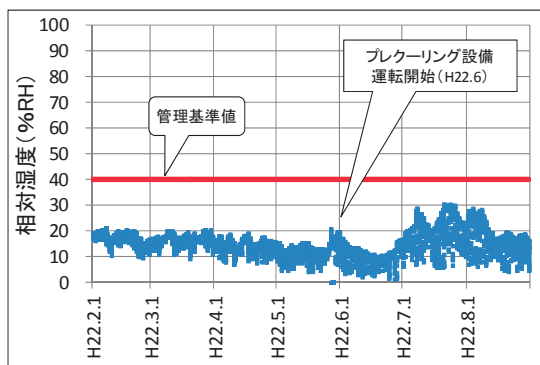


図-14 排気カバー部の相対湿度推移(第二大橋6P中央径間)
Fig.14 Transition of relative humidity at the air exhaust cover
(In the center span of the Second Kurushima – Kaikyo Br. 6P)

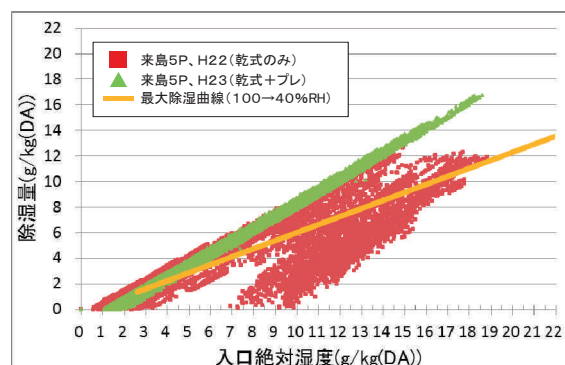


図-17 プレクーリング設備増設後の除湿能力(第二大橋5P)
Fig.17 Dehumidification capability after extension of the pre-cooling
facility (The Second Kurushima – Kaikyo Br. 5P)

- ②送気設備の除湿能力は、図-15、16、17、18に示すように除湿量が最大除湿曲線以上をプロットしており、各温度において除湿後の相対湿度は概ね40%RH以下となった。
- ③プレクーリング設備には一般の家庭で使用されている汎用エアコン（冷却能力2.5kW）を採用し、初期投資の削減（機器費：乾式除湿機約140万円/台、汎用エアコン約8万円/台）と信頼度の向上を図った。

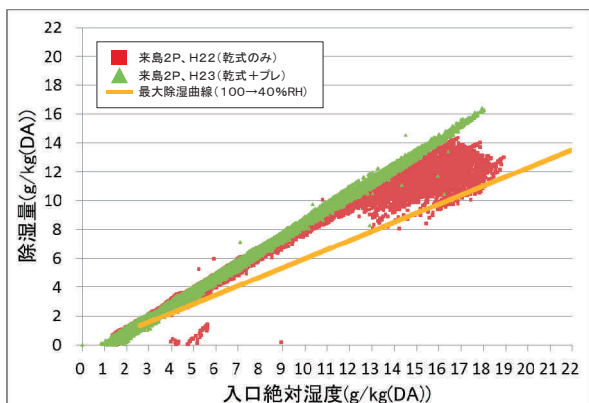


図-15 プレクーリング設備増設後の除湿能力(第一大橋2P)
Fig.15 Dehumidification capability after extension of the pre-cooling
facility (The First Kurushima – Kaikyo Br. 2P)

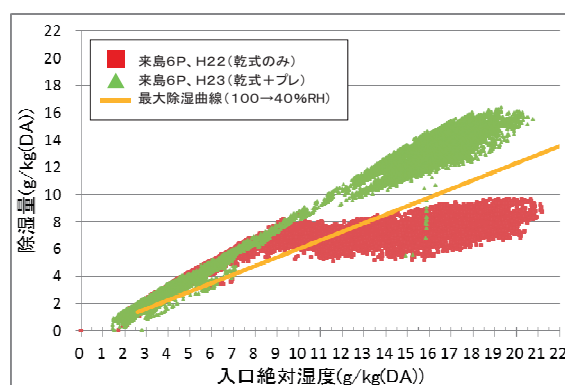


図-18 プレクーリング設備増設後の除湿能力(第二大橋6P)
Fig.18 Dehumidification capability after extension of the pre-cooling
facility (The Second Kurushima – Kaikyo Br. 6P)

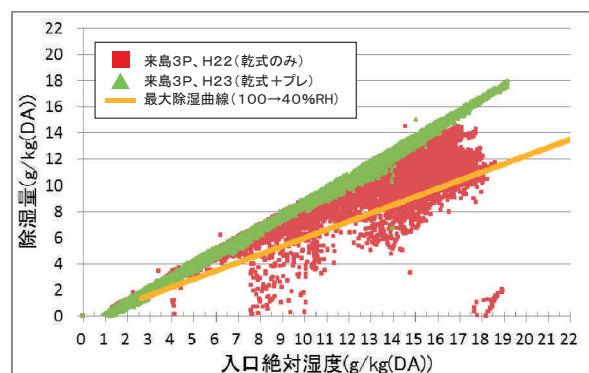


図-16 プレクーリング設備増設後の除湿能力(第一大橋3P)
Fig.16 Dehumidification capability after extension of the pre-cooling
facility (The First Kurushima – Kaikyo Br. 3P)

4. 最適な運転制御方法の検討

4.1 検討の概要

来島海峡大橋の送気乾燥システムは、橋梁架設工事中に主ケーブル内に浸入した水分の除去及び供用開始以降にケーブルバンド部などからの水分の浸入を防止するため、送気設備を24時間連続で運転しており年間の電気料金は全6系統で約350万円と高額である。

来島海峡大橋の送気設備は、前述のとおり乾式除湿機とプレクーリング設備とを組み合わせた設備仕様となっており、第二大橋6Pにおいて平成23年8月以降、乾式除湿機の運転制御条件を変更させたところ、主ケーブル内の相対湿度は管理基準値を概ね満足させつつ使用電力量を削減することができた。

以下に第二大橋6Pで試行した運転制御条件の変更による使用電力量の削減方法を報告する。

4.2 運転制御条件の変更

乾式除湿機を構成する主要機器の消費電力を表-3に示す。

表-3 主要機器の消費電力

Table 3 Power consumption of main equipment

構成機器	消費電力
再生ヒータ	4.50kW
ルーツブロウ	3.70kW
処理ファン	0.40kW
再生ファン	0.20kW
ルーツブロウ冷却ファン	0.15kW

使用電力量を効果的に削減するため、送気設備の構成機器のうち消費電力が大きい再生ヒータの運転制御条件の変更の可否を以下のとおり検討した。

- ①再生ヒータは、水分を吸着したロータを乾燥させるための熱風を精製するための熱源であり、常時140℃に加熱されている。乾式除湿機の除湿能力は、図-19に示すとおり冬期～春期にかけて除湿能力に約20%RH余裕があり、加熱温度（除湿能力）を低下させることができる。

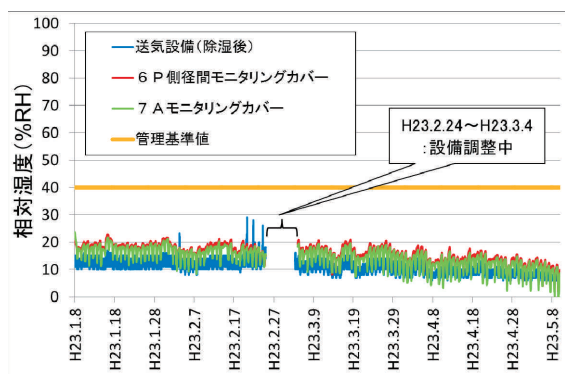


図-19 相対湿度の推移(第二大橋6P)

Fig.19 Transition of relative humidity (The Second Kurushima – Kaikyo Br. 6P)

- ②再生ヒータのように、電気エネルギーを熱エネルギーに変換する機器はジュールの法則より、発熱量を低下させることで使用電力量が削減できる。
- ③加熱温度を140℃から70℃に変更した場合、除湿機メーカーの除湿機性能表より、主ケーブル内の相対湿度は約30%RHに上昇するが、概ね管理基準値を満足できると推定された。
- ④加熱温度は、制御盤の再生温度指示調節計で容易に変更でき、改善費が不要である。

4.3 効果

平成23年冬期～春期に第二大橋6Pの乾式除湿機の再生ヒータの加熱温度を140℃から70℃に変更した結果、以下のような効果が確認できた。

- ①第二大橋6P送気系統の主ケーブル内の相対湿度は、図-20に示すとおり概ね管理基準値の40%RH以下となっている。

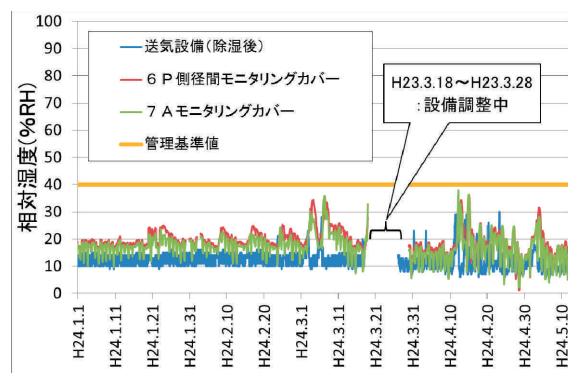


図-20 加熱温度変更後の相対湿度の推移(第二大橋6P)

Fig.20 Transition of relative humidity after change of the heating temperature (The Second Kurushima – Kaikyo Br. 6P)

- ②第二大橋6Pの送気設備の使用電力量は約83kWh/日、電気料金は平成23年度の平均単価で試算すると約15万円削減（約46%）できた。

5. 今後の課題と方針

来島海峡大橋の送気乾燥システムでは、ケーブルバンド部のシール補修による気密化及びプレクーリング設備の追加設置による除湿能力の向上により、主ケーブル内の相対湿度は年間を通じて管理基準値の40%RH以下を満足することができた。

また、第二大橋6Pの乾式除湿機の再生ヒータの加熱温度を140℃から70℃に変更し、使用電力量を約46%削減することができたが、今後は以下に示す課題の解決に取り組む、更なる効率化を目指す。

- ①プレクーリング設備の除湿能力は除湿前の温度が高くなるほど低下するため、今後は送気設備の設置環境が更に高温となる場合は、冷却能力の更なる向上が必要になると考えられる。
- ②主塔ごとに異なる送気延長や主要機器の仕様に適した運転制御方法を検証する必要がある。
- ③再生ヒータの加熱温度の抑制により、除湿機ユニットの内部機器の寿命化が期待できる。特にロータは1個当たり約60万円と高価であり、交換頻度の延長は維持管理費の削減に有効であるため、その効果を検証する必要がある。

参考文献

- 1) 本州四国連絡高速道路株式会社：吊橋ケーブルの送気乾燥による防食システム設計・施工・維持管理指針(案)、2009.6
- 2) 平下浩史：来島海峡大橋送気システムの実態と要求能力への改善、第18回技術発表会発表論文集、pp.73-76、2008.7
- 3) 田向和則、横井芳輝、朝倉義博：来島海峡大橋ケーブル送気乾燥システムによる防錆対策の評価、本四技報、vol.33、No.112、pp.43-48、2009.3

道路照明柱の基部腐食問題への対応

～判断基準等の策定～

Countermeasures against the Problems of the Corroded Base of the Road Lighting Poles
- Establishment of the Standard for Determination against the Road Lighting Poles Corroded -

保全部 電気通信課長代理

明野 晃治
Koji Akeno

概要

これまで照明柱の基部が腐食した照明柱の更新又は補修の判断を行う明確な基準がなく、変状が発見される度に強度計算や補修方法の検討を行っており、第三者等被害防止のための最適な構造物点検と迅速な補修対応が課題となっていた。本稿では、第三者等被害の発生を未然に防止し、かつ予防保全の観点から照明柱の腐食状況を的確に把握し、定量的に健全度の評価・判定を行い、適切な保全業務を実施するために策定した「腐食照明柱の更新又は補修の判断基準（案）」や「照明柱板厚測定調査要領（案）」並びに「照明柱補修方法に関するガイドライン（試行案）」の検討内容について報告する。

The standard for determining replacement or repair of the road lighting poles corroded has not been established so far. Strength calculation and repair methods of the road lighting poles were examined whenever deteriorations such as corrosion had been found. There existed the important issues that optimal structural maintenance and prompt actions of repair were needed in order to prevent damages for road users. This paper describes the details studied in that “Standard for Determining Replacement or Repair of the Road Lighting Poles Corroded (Draft)”, “Guideline to Measure the Plate Thickness of the Road Lighting Poles (Draft)”, and “Guideline for the Methods for Repairing the Road Lighting Poles (Trial)”, those of which were established for conducting the proper maintenance not to cause damages against road users while comprehending corrosive situations in terms of preventive maintenance and quantitatively evaluating soundness.

1. はじめに

他高速道路における照明柱の破断・落下事故にともない本四道路においても照明柱緊急点検を実施したところ、多数の照明柱の基部周辺が堆積土砂等により埋没し、この湿潤環境により腐食が進行していることが判明した。これまで照明柱の基部が腐食した照明柱の更新又は補修の判断を行う明確な基準がなく、点検において腐食等の変状を発見する度に照明柱の強度計算や補修方法の検討を実施してきた。道路沿いに設置している照明柱が基部腐食により倒壊した場合は、第三者等被害を引き起こす可能性が高いことから、第三者等被害防止のための最適な構造物点検と迅速な補修対応が課題となっていた。

今回実施した照明柱緊急点検の結果を受け、更に照明柱の板厚測定や設置環境調査を実施し、第三者等被害の発生を未然に防止し、かつ予防保全の観点から照明柱の腐食状況を的確に把握し、定量的に健全度の評価・判定

を行い、適切な保全業務を実施するために策定した「腐食照明柱の更新又は補修の判断基準（案）」や「照明柱板厚測定調査要領（案）」並びに「照明柱補修方法に関するガイドライン（試行案）」の検討内容の詳細について報告する。

2. 照明柱の現状

2.1 照明柱緊急点検の実施

平成22年11月9日に他高速道路において、照明柱が疲労により破断・落下し、車3台が損傷する事故が発生し、本四道路においても照明柱緊急点検を実施したところ、225本（総点検数5,013本）の照明柱に基部腐食等の変状が確認された。点検の結果、照明柱基部が堆積土砂等による湿潤環境により腐食している箇所が多く発見され、メッキ層の腐食を越えて本体鋼製部分の全周が腐食している著しい変状から、メッキ層の一部のみが腐食してい

表-1 照明柱緊急点検結果

Table 1 Result of the Emergency Inspection of the Road Lighting Poles

(単位:本)

管理センター	点検総数	メッキ層の腐食を越えて本体鋼製部分の全周が腐食(穴や亀裂までは無い)	メッキ層の腐食を越えて本体鋼製部分の一部が腐食(穴や亀裂までは無い)	メッキ層の全周が腐食(本体鋼製部分の腐食はない)	メッキ層の一部が腐食している(本体鋼製部分の腐食はない)	その他	合計	備考
神戸管理センター	1,456	0	14	30	29	5	78	
鳴門管理センター	680	20	15	0	1	2	38	
岡山管理センター	414	9	21	0	0	13	43	
坂出管理センター	1,178	11	11	4	14	0	40	
しまなみ尾道管理センター	626	0	1	3	5	6	15	
しまなみ今治管理センター	659	0	2	1	8	0	11	
合計	5,013	40	64	38	57	26	225	



写真-1 照明柱全景

Photo.1 General View of Road Lighting Pole



写真-2 照明柱基部腐食状況例

Photo.2 Examples of the Corroded Base of the Road Lighting Poles

本調査は、メッキ層の腐食を越えて本体鋼製部分の全周が腐食している照明柱と隣接する変状のない照明柱及び一部が腐食している照明柱を対象とした。

項番	項目	全体(本)	割合 %	神戸	鳴門	岡山	坂出	尾道	今治	備考
	調査本数	135	100.00%	14	49	40	29	1	2	
①	板厚が必要板厚以下 ※	0	0.00%	0	0	0	0	0	0	
②	ポール内滞水	13	9.63%	6	1	6	0	0	0	最大1000mmが一カ所あり
③	基部が埋没	76	56.30%	11	29	19	16	1	0	
④	湧水有り	1	0.74%	1	0	0	0	0	0	
⑤	隣接排水柵有り	7	5.19%	2	5	0	0	0	0	
⑥	隣接する排水溝、のり面排水口	68	50.37%	8	35	10	14	1	0	
⑦	日射状況不良	68	50.37%	3	35	21	9	0	0	
⑧	過去の補修有り	23	17.04%	5	0	9	8	1	0	
⑨	撤去の検討有り	2	1.48%	0	0	2	0	0	0	

※設計風速60m/sec

①② 写真なし

③ 坂出-16



⑤ 鳴門-26



⑦ 坂出-5



⑨ 岡山-23



④ 神戸-5



⑥ 岡山-18



⑧ 神戸-11



図-1 板厚測定調査及び設置環境調査結果

Fig.1 Result of the Plate Thickness and the Environment of the Road Lighting Poles

る軽微な変状まで様々であることが判明した。照明柱緊急点検結果を表-1に示す。

2.2 板厚測定調査及び設置環境調査の実施

照明柱緊急点検結果を受け、更なる詳細調査として、腐食照明柱の板厚測定調査及び設置環境調査を以下のとおり実施した。

板厚測定調査は、照明柱基部のメッキ層の腐食を超えて本体鋼製部分の全周又は一部が腐食している照明柱（全周腐食：40本、一部腐食：64本）を対象とした。板厚測定調査の結果、撤去等の緊急対応が必要な腐食照明柱は無かったが、最も腐食が著しい照明柱については、設置後13年間で1.4mm（0.108mm/y）の減肉腐食を確認した。

設置環境調査は、照明柱基部のメッキ層の腐食を超えて本体鋼製部分の全周が腐食している照明柱及び隣接する変状のない照明柱（2本程度）並びに本体鋼製部分の一部が腐食している照明柱の合計135本を調査対象とした。設置環境調査の結果、調査対象の内76本の照明柱地際部に堆積土砂等による基部埋没を確認した。この堆積土砂や植栽等の腐葉土により、照明柱の基部が湿潤状態となり腐食が進行したものと思われる。

3. 腐食照明柱の更新又は補修の判断基準（案）

の制定

3.1 概要

照明柱の変状程度は個々の照明柱によってその性能に与える影響が異なる。このため、全ての照明柱の変状程度を同一の基準及び精度で統一することは困難である。

しかし、各々の照明柱に対して、ある程度統一した判断基準を用いて定量的に健全度の評価・判定を行うことが必要なため、判定の区分を示すこととした。

3.2 適用基準

照明柱の更新又は補修の判断の基となる必要板厚は、「照明用ポール強度計算基準（JIL1003）」（社）日本照明器具工業会¹⁾により算出した。

3.3 照査風速

板厚は「照明用ポール強度計算基準（JIL1003）」に示された設計風速60m/s（最大瞬間風速）に対して照査するものとし、地形の影響、照明柱の高さ等を考慮する必要がある場合には、風速を増減することができるものとした。

3.4 必要板厚

必要板厚は鋼材の降伏点強度に対して算出した。算出結果を表-2に示す。

3.5 残存板厚

腐食照明柱の残存板厚については安全側に判断できるように、最小板厚を用いることとした。

3.6 判定区分と対応措置

照明柱の腐食に対する判定区分と対応措置は表-3のとおりとし、判断基準（案）の概念を図-2に示す。この判定区分は点検管理要領（一般土木構造物点検・長大橋点検）と整合を図っている。判定区分設定の検討経緯を以下に示す。

(1) 判定区分の設定に考慮すべき要因

照明柱の更新または補修は、算出した必要板厚を基に以下の要因を考慮して判断する必要がある。

- ① 必要板厚は降伏点強度に対して算出されているが、腐食した照明柱は強度試験体とは違って表面に凹凸があり、応力集中の影響で強度の低下が懸念されるため、ある程度の板厚余裕が必要である。
- ② 設計風速には地形的要因による風速の増減、風による振動等の動的影響を考慮していないため、

表-2 照明柱別必要板厚

Table 2 Minimum Plate Thickness of the Road Lighting Pole

照明柱種別	標準板厚 (mm)	必要板厚 (mm)	灯具種別	備考
13.5-35	6.5	3.27	KSC-7	
13.5-35	4.5	3.16	KSC-7	
12-28	6.3	2.78	KSC-4	
12-28	4.5	2.68	KSC-4	
12-28	4.4	2.68	KSC-4	
12-28	4.2	2.66	KSC-4	
10-23	4.5	2.3	KSC-4	
10-23	4.4	2.3	KSC-4	
10-23	4.2	2.29	KSC-4	
10-23	4.0	2.28	KSC-4	

表-3 腐食照明柱の更新又は補修の判断基準（案）

Table 3 Standard for Determining Replacement or Repair of the Road Lighting Poles Corroded (Draft)

判定区分	一般的状況	腐食及び亜鉛メッキ劣化状況	残存板厚、腐食量	対応措置(注)
E	お客様又は第三者に対し被害を及ぼす恐れがあり、緊急補修の必要がある場合。	減肉腐食が激しく進み、必要板厚が確保できない。	板厚が必要板厚より少ない。	早急に撤去するか、倒壊防止の応急措置を行う。なお、応急措置の後、早期に撤去する必要がある。
A	変状が著しく、安全性能又は仕様性能から見て、緊急補修の必要がある場合(E判定以外のもの)	減肉腐食がかなり進んで、必要板厚の余裕が僅かである。	必要板厚の余裕が概ね20%未満である。	応急防食措置を行うとともに、ライフサイクルコスト等を判断して早期に補強するか撤去する。
B	変状があり、性能、機能低下が見られ補修が必要であるが、緊急性を要しない場合。又は予防保全の見地から補修が必要な場合。	B1 減肉腐食しているが、必要板厚に対してある程度余裕がある。	必要板厚の余裕が概ね50%未満である。	応急防食措置を行い、補強を行う。なお、減肉状況によっては撤去又は補修することも考える。
		B2 亜鉛メッキの防せい機能が喪失して、さびが発生しているが、減肉腐食は僅かである。	必要板厚の余裕が概ね50%以上である。	応急防食措置を行い、防食補修を行う。
C	変状はあるが、性能又は機能低下は見られない。変状の進行状況を継続的に観察するか、又は詳細調査を実施する必要がある場合。	亜鉛層が消耗し、メッキ合金層が露出している。さびについては点さびが発生している程度である。	減肉腐食していない。	応急防食措置を行い、経過観察する。また、減肉腐食しないように防食補修を計画的に行う。
D	変状がないか、又は軽微な場合。	亜鉛層が劣化し、白さびが広範囲に発生している。		対応なし。
Q	変状の有無・程度の判定が困難で、別の手法により再点検する必要がある場合。			再点検を実施する。

(注)・別途、基部の腐食環境を改善すること。

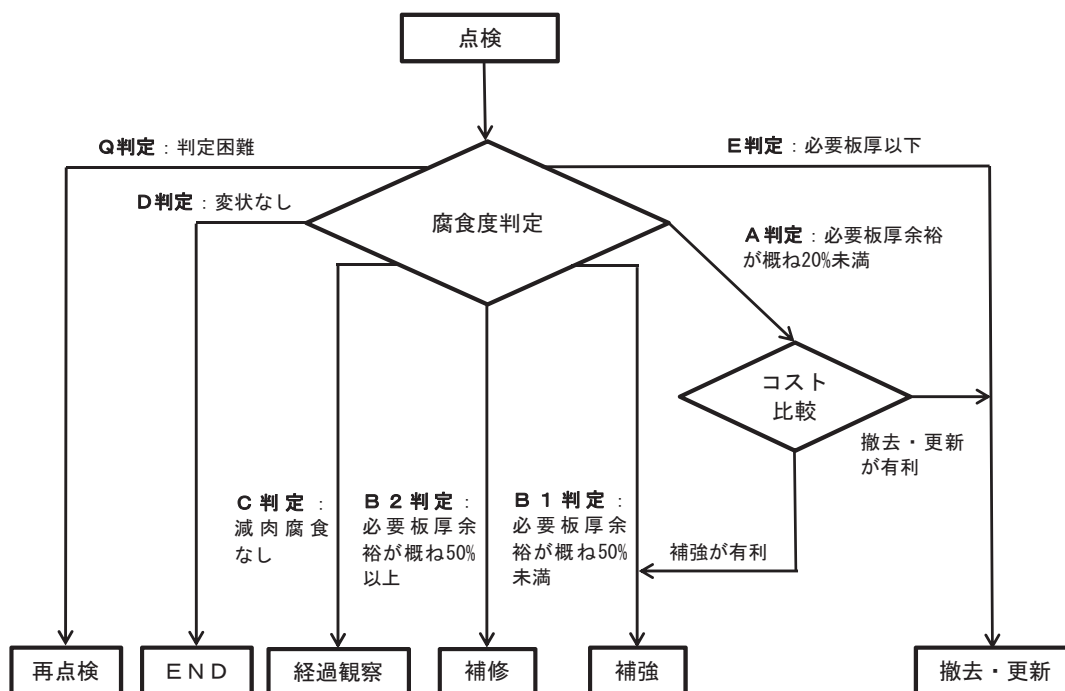


図-2 判断基準（案）概念

Fig.2 Concept of Standard for Determining Replacement or Repair of the Road Lighting Poles Corroded (Draft)

状況に応じた板厚余裕が必要である。

- ③ 板厚の測定誤差を考慮した板厚余裕が必要である。
- ④ 補強・補修の完了までに時間を要する場合、または次回の点検までの期間に腐食が進むため、板厚余裕が必要である。

(2) 判断基準

(1)の判定区分の設定に考慮すべき要因に対する板厚余裕の必要度合いについて、以下のとおり検討し、減肉腐食している照明柱に対して、必要板厚未満の照明柱、板厚余裕が20%未満、50%未満及び50%以上の区分で判断基準を設定した。

- ① 超音波厚さ計による測定誤差²⁾の観点から、腐食凹凸面の測定のため必要板厚の20%を板厚余裕として考慮することとした。
- ② 板厚測定調査の実績から腐食速度0.22mm/y（両面の腐食速度：0.108mm/y×2）を板厚余裕として考慮することとした。
- ③ 板厚余裕50%未満・以上の判定区分は、板厚余裕20%（A判定）の残存板厚に対しても、測定誤差として必要板厚の20%を計上するとともに、補修等対応までの期間も考慮し1年分の腐食速度0.22mm/yを計上すると概ね必要板厚の50%に相当することから設定した。

(3) 減肉腐食している照明柱に対する判定区分の設定

(1)及び(2)を総合的に判断して、減肉腐食している照明柱の判定区分を以下のとおり設定した。

- ① 必要板厚未満
即対応が必要（E判定）
- ② 板厚余裕が20%未満
早期に緊急措置が必要（A判定）
- ③ 板厚余裕が50%未満
概ね1年以内に補強（B1判定）
- ④ 板厚余裕が50%以上
予防保全の見地から計画的に補修（B2判定）

なお、腐食照明柱の更新又は補修の判断は、原則、本判断基準（案）によるものとするが、標準的でない照明柱や設置場所が特殊な場合などは、照明柱の構造や現場状況により対応するものとした。

4. 照明柱板厚測定調査要領（案）の制定

4.1 概要

3.の判断基準（案）に用いる残存板厚の測定について、異なる測定者が板厚測定を実施しても測定精度を維持できるように、板厚測定調査における実経験を基に超音波厚さ計の仕様から板厚測定時の注意事項を盛り込み「照明柱板厚測定調査要領（案）」（以下、板厚測定要領（案）という。）を制定した。

4.2 適用基準

判断基準（案）に用いる残存板厚の測定方法は、超音波パルス反射法による厚さ測定を原則とし、「超音波パルス反射法による厚さ測定方法（JIS Z 2355）」、「附属書 2（規定）腐食部の厚さ測定方法」及び「附属書 4（規定）管材の厚さ測定方法」³⁾に準拠したものであり、以下に使用機材や測定方法の詳細を示す。

4.3 使用機材

(1) 超音波厚さ計

測定精度±0.1mmと同等以上の精度を有する汎用超音波厚さ計の使用を原則とした。なお、超音波厚さ計のうち、塗膜や腐食部を取り除くことなく測定可能な測定装置を使用する場合は、正確に板厚を測定するには専門知識及び技量を要するため、取扱いには注意が必要である。

(2) 探触子（トランスデューサー）

一般的に薄板測定に使用される二振動子垂直探触子の使用を原則とした。

(3) 校正用試験片

測定物と同等の材質で、測定物の厚さに近い平面試験片を用いるものとした。

(4) 接触媒質

合成グリセリンの使用を原則とするが、使用する測定装置により装置製造業者指定の接触媒質を用いるものとした。

4.4 測定準備

(1) 測定点の選定

板厚測定調査の結果、照明柱の腐食状況は様々であり、照明柱基部腐食部は本体鋼製部分の全周が一律に減肉腐食するとは限らないため、以下のとおり測定点を選定するものとした。

- ① 測定点は照明柱地際部の4方向を基本とした（図-3参照）。
- ② 測定点が腐食している場合は、ハンマーやワイヤーブラシ等により表面錆を概ね除去し、4方向それぞれの最も板厚が減少している部分を測定点とした。
- ③ 地際部4方向以外が腐食している場合は、4方向以外の腐食部も測定点として追加するものとした。
- ④ 照明柱と基礎の境界部分が著しく減肉腐食し、境界部分の腐食状況を確認する必要がある場合は、基礎コンクリートをはつり、最も板厚が減少している部分を測定点とするものとした（図-4参照）。

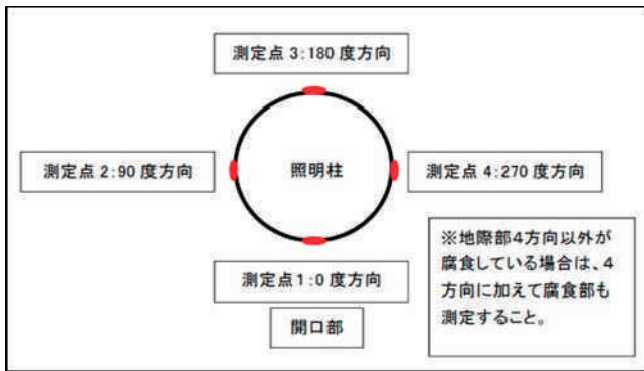


図-3 照明柱地際部測定点
Fig.3 Measuring Point around the Base of the Road Lighting Pole

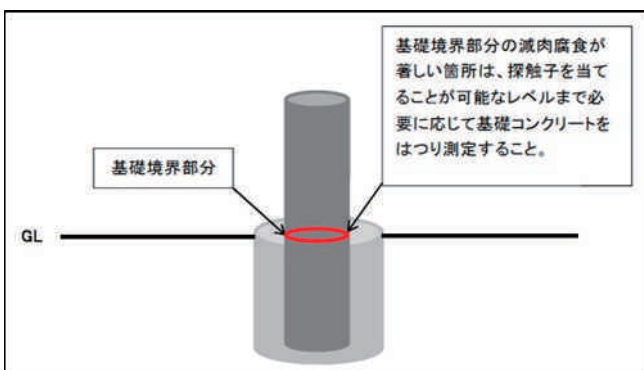


図-4 基礎境界部分測定箇所
Fig.4 Measuring Point in Boundary of the Foundation

(2)測定面の前処理

測定面をグラインダー、リューター又はサンドペーパー等により腐食凹凸面を平滑化するものとした。測定面の前処理の必要性としては、超音波厚さ計により板厚測定を行うには、探触子（トランスデューサー）を測定面に接触させる必要があり、測定面が平滑でなければ、測定精度が低下するためである。

(3)校正値の確認

測定器誤差の許容値は $\pm 0.1\text{mm}$ 以内とし、測定前後に校正値が許容値以内であることを確認するものとした。校正値が許容値を超えている場合は、測定器の校正を行うものとした。

4.5 腐食照明柱の板厚測定

腐食照明柱の板厚測定は、以下の理由により1回測定法により測定するものとした。「附属書2（規定）腐食部の厚さ測定方法」では、裏面がほぼ平滑と判断される場合は1回測定法、裏面が腐食しているか、又は腐食していると推定される場合は2回測定法によると規定されている。外面からの確認では、裏面の状態は判断できないため、腐食照明柱の板厚測定は2回測定法を採用する

ものとした。

なお、測定値が変動し、測定値の確認が困難な場合は、測定面の前処理を再度行い再測定するものとした。

5. 照明柱補修方法に関するガイドライン（試行案）の制定

5.1 概要

「照明柱補修方法に関するガイドライン（試行案）」（以下、補修ガイドライン（試行案）という。）は、本州四国連絡高速道路において、近年に実施した照明柱の補修、腐食防止対策及び基部周辺の環境改善対策の実績を基にした事例集であり、第三者等被害の発生を未然に防止、かつ予防保全の観点から実施する照明柱の補修、腐食防止対策及び基部周辺の環境改善対策例を示し、照明柱の適切な維持管理を行うことを目的として制定した。

5.2 照明柱の補修、腐食防止対策及び基部周辺の環境改善対策

補修、腐食防止対策及び基部周辺の環境改善対策が必要と判断された照明柱に対しては、腐食原因を特定し、現場状況に応じた適切な補修、腐食防止対策及び基部周辺の環境改善対策を選定し、実施するものとした。

なお、腐食原因の特定及び補修方法等の選定が困難な場合は、必要に応じて専門家の意見を聞くこととした。

今回、とりまとめた照明柱の補修、腐食防止対策及び基部周辺の環境改善対策例を以下に示す。

(1)照明柱の補修及び腐食防止対策

- ① 防せい処理剤（常温亜鉛めっき塗料、さび安定化処理剤等）による処置
- ② 防食テープによる処置
- ③ コンクリート巻きによる処置（写真-3参照）
- ④ 液体ゴムによる処置（写真-4参照）
- ⑤ 紫外線硬化型FRPシートによる処置

(2)照明柱の基部周辺の環境改善対策（湿潤環境の改善）

- ① 照明柱周辺の樹木等の伐採
堆積土砂・植物の除去
- ② 碎石敷き込み、コンクリート打ちによる防草対策（写真-5参照）
- ③ 土留壁設置



写真-3 コンクリート巻き補修（施工前・施工後）
Photo.3 Repair of the Pole Covered by Concrete around the Base



写真-4 液体ゴム防食補修（施工前・施工後）
Photo.4 Repair of Corrosion Protection Coated by Liquid Rubber



写真-5 照明柱基部環境改善（施工前・施工後）
Photo.5 Improving Environment around the Base of the Pole

6. 判断基準等策定の成果

判断基準（案）、板厚測定要領（案）及び補修ガイドライン（試行案）を策定した結果、照明柱基部腐食部の残存板厚を測定することで迅速な対応措置の判断が可能となり、かつ補修対策の実例を参考にすることで迅速な補修対応も可能となり第三者等被害防止対策の実現ができたと考える。

これらの判断基準等標識柱の更新・補修判断基準案の策定及び標識柱詳細点検において、標識柱基部腐食部の板厚測定作業の要領としても採用されており、第三者等被害防止に向けた保全業務の重要な取組に貢献できた。

7. おわりに

第三者等被害防止のための最適な構造物点検と迅速な補修対応を実施するために判断基準等の策定を行い、現場で運用されている。今後の点検及び補修実績によるフォローアップを継続し、お客様に安全、安心、快適なサービスを提供できるよう、適切な維持管理に努めていきます。

各管理センターの方々には、照明柱緊急点検及び各種調査に多大なご協力をいただきました。また、判断基準等の策定にあたり、技術的意見等で多大なるご協力、ご指導をいただいた本社及び各管理センターの関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社) 日本照明器具工業会：照明用ポール強度計算基準 (JIL1003)
- 2) (社) 日本非破壊検査協会：面の凹凸に起因する超音波厚さ測定誤差の一補正法、非破壊検査 2004.5
- 3) 日本工業標準調査会：超音波パルス反射法による厚さ測定方法 (JIS Z 2355)、附属書2（規定）腐食部の厚さ測定方法、附属書4（規定）管材の厚さ測定方法

走行型計測技術によるトンネル 覆工コンクリートの調査

Tunnel inspection by using mobile imaging technology.

保全部 道路保全課長	今井清裕 Kiyohiro Imai
保全部 道路保全課長代理	杉山剛史 Takeshi Sugiyama

概要

トンネル覆工コンクリートの点検は、これまで目視点検を主体として実施しているが、暗い坑内環境下における作業であり、変状の位置や情報を正確に記録する事が困難である。このため、目視点検に代わる手法として走行型計測技術を点検業務に導入した。この手法は点検業務の効率化を目的としており、覆工コンクリートのひび割れの定量化や打音検査実施箇所のスクリーニングが可能である。本報告は、走行型計測技術によるトンネル覆工コンクリートの点検手法とこれを本州四国連絡高速道路の道路トンネルに適用して得られた現状について報告を行うものである。

A tunnel lining concrete has been inspected mainly through a visual inspection. However, since a tunnel inspection is conducted in a dark condition, it is difficult to identify and record defects in the tunnel correctly. Because of these reasons, mobile imaging technology was applied to the tunnel inspection instead of the visual inspection. This technology is applied in order to conduct the tunnel inspection efficiently. In addition, this technology can quantify cracks on the tunnel lining concrete and be used for screenings of a hammering test area. This paper presents the tunnel inspection by using mobile imaging technology and a current tunnel condition in the Honshu Shikoku Bridge Expressway obtained by this technology.

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。)では点検業務の効率化を目的として平成24年3月に点検管理要領の改訂を行った。一般土木構造物点検においては、これまで目視主体であった点検手法をより確実なものとするため、近接・打音検査を基本としている。近接・打音検査を実施する場合は、対象構造物へ接近するための足場が必要であり、また点検に時間を要することとなる。このため、点検管理業務のより効率化を図ることを目的として、近接・打音検査を基本としつつ、非接触計測技術を積極的に導入することとした。近年非接触計測技術の進展に伴い数々の計測機器が維持管理業務にも使用されてきている。これまでトンネル覆工コンクリートの点検は、管理路等から双眼鏡等を用いた目視点検を主体として実施し、異常が発見された場合は高所作業車を利用して近接・打音検査等を実施するという二段階の作業が必要であった。また、暗い坑内環境下における点検作業では、ひび割れの形状や位置を変状マップに正確にトレースするのは非常に困難な作業となる。更に、

トンネル覆工コンクリートの点検の重要性は高いが、全面打音点検は、多大な時間と費用を必要とする点検業務であった。今回、トンネル覆工コンクリートについて点検の効率化及び変状の定量化を図ることを目的として非接触計測技術の一つである走行型計測技術による点検手法を導入した。

本報告はトンネル覆工コンクリートの走行型計測技術による点検手法とその点検結果について報告を行うものである。また、別に実施したトンネル全面打音検査と計測結果を比較する事により、変状のスクリーニング手法について検討を行ったので、その結果を合わせて報告する。

2. トンネル点検における走行型計測技術

2.1 計測方法

トンネル覆工コンクリート点検における走行型計測技術には、車両に搭載したカメラやレーザースキャナーにより覆工コンクリート表面画像を取得するものと3Dレーザースキャナーによって覆工表面の形状を3次元の座標データ(点群データ)として取得するものがある。前

者は覆工コンクリート表面のひび割れ等を計測するものであり、後者はトンネル覆工コンクリートの変形・変位を計測するものである。

本四高速においては、トンネル覆工表面の状態を把握して打音点検を実施する箇所を選定することを主な目的としてトンネル覆工画像測定法を採用した。本州四国連絡高速道路（以下「本四道路」という。）のトンネルは表-1に示すように全てNATM工法によって施工されている。NATM工法の場合、特殊な場合を除いてトンネル覆工には力学的な機能を持たせない。このため覆工コンクリートの変形・変位についてはひび割れ等の状況を確認してから判断することとした。

表-1 トンネル諸元一覧
Table.1 Tunnel dimensions

トンネル基本情報								覆工コンクリート計測		
トンネル名称	区分	延長(m)	通行区分	施工方法	車線数	等級区分	覆工厚(mm)	車道幅員	計測日	計測方法
布施畑トンネル	上り	848	分離	NATM	2	A	30	7	2011/6/9	ハイビジョン
	下り	854	分離	NATM	2	A	30	7	2011/6/9	ハイビジョン
高塚山トンネル	上り	1,210	分離	NATM	2	A	30	7	2011/6/9	ハイビジョン
	下り	1,181	分離	NATM	2	A	30	7	2011/6/9	ハイビジョン
舞子トンネル	上り	3,290	分離	NATM	3	AA	50	10.75	2011/6/8	ハイビジョン
	下り	3,250	分離	NATM	3	AA	50	10.75	2011/6/8	ハイビジョン
に井トンネル	上り	378	分離	NATM	暫2	B	40	7	2011/6/8	ハイビジョン
	下り	429	分離	NATM	暫2	B	40	7	2011/6/8	ハイビジョン
川井谷トンネル	上り	260	分離	NATM	暫2	B	40	7	2011/6/8	ハイビジョン
	下り	260	分離	NATM	暫2	B	40	7	2011/6/8	ハイビジョン
第一鳴門トンネル	上り	191	分離	NATM	2	C	30	7	2011/6/7	ハイビジョン
	下り	201	分離	NATM	2	C	30	7	2011/6/7	ハイビジョン
第二鳴門トンネル	上り	374	分離	NATM	2	B	30	7	2011/6/7	ハイビジョン
	下り	353	分離	NATM	2	B	30	7	2011/6/7	ハイビジョン
撫養トンネル	上り	770	分離	NATM	2	B	30	7	2011/6/7	ハイビジョン
	下り	616	分離	NATM	2	B	30	7	2011/6/7	ハイビジョン
正面山トンネル	上り	538	分離	NATM	2	A	30	7	2010/10/20	レーザー
	下り	538	分離	NATM	2	A	30	7	2010/10/20	レーザー
柳田トンネル	上り	387	分離	NATM	2	B	30	7	2010/10/20	レーザー
	下り	331	分離	NATM	2	B	30	7	2010/10/20	レーザー
塩生トンネル	上り	408	分離	NATM	2	B	30	7	2010/10/20	レーザー
	下り	401	分離	NATM	2	B	30	7	2010/10/20	レーザー
鷹羽山トンネル	上り	205	分離	NATM	2	B	60	7	2011/6/6	ハイビジョン
	下り	205	分離	NATM	2	B	60	7	2011/6/6	ハイビジョン
宮窪トンネル	—	1,420	対面	NATM	2	B	30	7	2011/6/6	ハイビジョン
西海トンネル	—	356	対面	NATM	2	B	30	7	2011/6/6	ハイビジョン
近見山トンネル	—	1,138	対面	NATM	2	B	30	7	2011/6/6	ハイビジョン

トンネル覆工画像の測定方式については写真-1に示すようにトンネル覆工表面をコピー機のようにレーザーの走査によって画像を取得していく方法と写真-2に示すようにハイビジョンカメラによって直接覆工表面を撮影する方法の2つがある。どちらの方法も覆工コンクリート表面のひび割れを計測することを目的としており、その精度も同程度の計測手法である。しかし、ハイビジョン画像取得は強力なライトを当ててカラー画像を撮影するため、覆工コンクリート表面の状態を画像上でより精細に観察することが可能である。

本四道路には表-1のように15トンネル（22チューブ）があるが、計測の都合で岡山管理センター管内の3トンネル（正面山TN、柳田TN、塩生TN）はレーザー計測手法により実施¹⁾し、それ以外のトンネルは全てハイビジョンカメラによる撮影手法により実施²⁾³⁾している。

2.2 ひび割れ変状展開図

今回、取得した画像から読み取ったひび割れ、遊離石灰等覆工コンクリートの変状情報についてのひび割れ展開図を図-1のように作成した。近年、取得した画像からひび割れ等の自動判読を直接行う解析ソフトウェアが開発されているが、ある程度までの判読は可能でも、ひ



写真-1 レーザー計測車両による計測状況

Photo.1 Tunnel inspection by mobile laser beam system



写真-2 ハイビジョンカメラ計測車両による計測状況

Photo.2 Tunnel inspection by mobile high-vision camera system

び割れ注入の跡やコンクリートの模様、影などの区別までは自動判読が出来ないため、人の手によってトレースしたものである。

なお、今回、実施したひび割れ展開図の作成では変状情報をデジタルデータとして持たせているため、ひび割れの幅、方向等を自由に集計することが可能となっている。

2.3 トンネル健全度評価方法

山田他⁴⁾は、トンネル覆工コンクリートの近接・打音検査の必要性を判定するために、ひび割れ展開図から読み取った覆工コンクリートのひび割れの幅、規模、パターン等についてとりまとめたトンネル評価点算出シート（表-2）を作成して定量化を行うことを提案している。トンネル評価点算出シートは1スパンごとに作成することを推奨している。また、トンネル評価点算出シートの評価区分では十分に評価出来ない表-3に示す8項目について覆工コンクリートの表面画像を用いて行う先行判定項目（「観察項目における特記事項」という。）として抽出することを提案している。

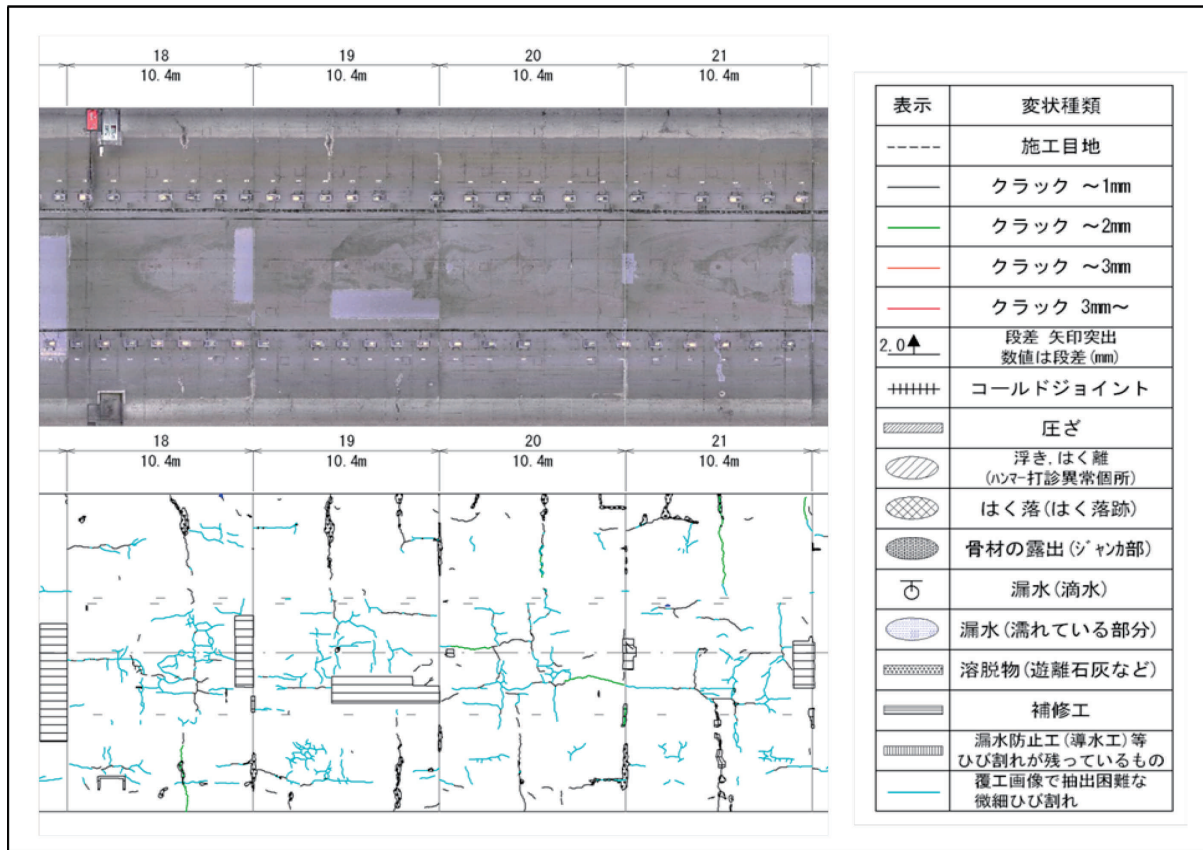


図-1 ひび割れ展開図

Fig.1 Crack map

表-2 トンネル評価点算出シート⁴⁾

Table.2 Evaluation sheet of tunnel condition

観察項目	評価区分		check (該当■)	外力判定 (該当■) 点数		はく落判定 (該当■) 点数	
	数値算出結果の評価	画像目視の評価		評価点	点数	評価点	点数
1. 最大ひび割れ幅 (別添参考図参照)	なし	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
	最大1mm程度がある	細め	<input type="checkbox"/>	4	3	0	0
	最大2mm程度がある	中程度	<input type="checkbox"/>	8	5	0	0
	最大3mm程度がある	太め	<input type="checkbox"/>	11	8	0	0
	最大4mm程度以上	非常に太め	<input type="checkbox"/>	15	10	0	0
2. 最大ひび割れ幅の長さ (連続している箇所) ※補修工事により 全長を把握できない箇所は 不明で判断する。	横断	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
		1/4アーチ長未満	<input type="checkbox"/>	4	1	0	0
		1/4~1/2アーチ長未満	<input type="checkbox"/>	5	3	0	0
	縦断	1/2~1アーチ長未満	<input type="checkbox"/>	8	4	0	0
		1アーチ長	<input type="checkbox"/>	10	5	0	0
		なし	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
3. 方向性 (別添参考図参照)	なし	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
	70%以上が横断方向	横断卓越型	<input type="checkbox"/>	4	2	0	0
	縦横断方向各々50%程度	縦横断拮抗型	<input type="checkbox"/>	7	4	0	0
	70%以上が縦断・斜め方向	縦断・斜め卓越型	<input type="checkbox"/>	11	6	0	0
4. ひび割れの分布	なし	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
	密度「~20cm/m」	局部的に発生している	<input type="checkbox"/>	3	4	0	0
	密度「20~50cm/m」	全般に分散し、発生している	<input type="checkbox"/>	7	7	0	0
	密度「50cm/m以上」	全般に発生している	<input type="checkbox"/>	10	11	0	0
5. 亀甲状・閉合型・交差・分岐	なし	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
	1m未満以内	なし	<input type="checkbox"/>	7	11	0	0
	1m以上	なし	<input type="checkbox"/>	14	22	0	0
6. 遊離石灰	なし	なし	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0
	5箇所未満	少ない	<input type="checkbox"/>	2	4	0	0
	5~9箇所	中程度	<input type="checkbox"/>	3	8	0	0
7. 漏水	10箇所以上	多い	<input type="checkbox"/>	5	12	0	0
	なし or (漏水防止帯等で補修済み)	少ない	<input type="checkbox"/>	0	0	0	0

表-3 観察項目における特記事項⁴⁾

Table.3 Special notes for tunnel inspection

画像判定における先行判定項目	
1	幅2mm程度のひび割れが3m以上ある
2	幅3mm程度以上のひび割れがある
3	打継目に三日月型のひび割れがある
4	ジェットファン、標識等点が施設周辺に放射状のひび割れがある
5	構造上問題があると診断されるひび割れがある
6	モルタル系の補修材による既対策箇所がある
7	豆板(ジャンカ)などがあり、浮き・はく落の危険性がある
8	既設の点検データより損傷が認められ落下の危険性がある

これは、これらの項目があった場合は、剥落につながる危険性があることが経験的に分かっていることからトンネル評価点算出シートの評価に関わらず、1項目でも該当すれば現地で近接・打音検査によって確認が必要としているためである。

トンネル覆工コンクリートのひび割れに関しては、NEXCO設計要領第三集トンネル編³⁾(1)トンネル本体工保全編(変状対策)にひび割れ密度に関する補修ランクが設定されており、ひび割れ集計一覧表(表-4)を作成し、トンネル評価点算出シートと合わせて総合的に評価することとされている。ひび割れ集計一覧表は各スパンごとのひび割れ状況について、ひび割れ幅別の延長、幅別のひび割れ密度を集計したものである。ひび割れ密度が大き

表-4 ひび割れ集計一覧表の例

Table 4 Example of crack summary table

調査場所		神戸淡路鳴門自動車道 布施畑トンネル(上り線) 3.059 KP ~ 3.907 KP												調査年月		西暦2011年6月9日		補修 ランク ※2
スパン No	幅別延長(m)							幅別ひび割れ密度 (cm/m ²)							幅(mm)			
	0.2< ≦0.5	0.5< ≦1.0	1.0< ≦2.0	2.0< ≦3.0	3.0<	2.0mm 以上	合計	0.2< ≦0.5	0.5< ≦1.0	1.0< ≦2.0	2.0< ≦3.0	3.0<	2.0mm 以上	合計 ※1	最	大	平	
1	0.94	4.74	0.39	0.00	0.00	0.00	6.06	0.55	2.80	0.23	0.00	0.00	0.00	3.59	2.0	0.7		III
2	1.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.74	1.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.03	0.5	0.4		III
3	1.66	2.44	0.74	0.00	0.00	0.00	4.84	0.98	1.44	0.44	0.00	0.00	0.00	2.86	2.0	0.7		III
4	3.11	0.59	0.68	0.00	0.00	0.00	4.38	1.84	0.35	0.40	0.00	0.00	0.00	2.59	2.0	0.6		III
5	1.55	0.66	0.00	0.00	0.00	0.00	2.21	0.92	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	1.30	1.0	0.5		III
6	4.84	2.77	1.22	0.29	0.00	0.29	9.13	2.86	1.64	0.72	0.17	0.00	0.17	5.40	3.0	0.7		III
7	1.95	2.54	1.34	0.00	0.00	0.00	5.83	1.15	1.50	0.79	0.00	0.00	0.00	3.45	2.0	0.8		III
8	8.14	4.24	0.00	0.00	0.00	0.00	12.38	4.81	2.51	0.00	0.00	0.00	0.00	7.32	1.0	0.5		III
9	6.32	5.44	3.81	0.00	0.00	0.00	15.58	3.74	3.22	2.26	0.00	0.00	0.00	9.21	2.0	0.8		III
10	3.31	4.30	1.88	0.00	0.00	0.00	9.49	1.96	2.54	1.11	0.00	0.00	0.00	5.62	2.0	0.8		III
11	6.05	12.59	10.30	0.00	0.00	0.00	28.94	3.58	7.45	6.09	0.00	0.00	0.00	17.12	2.0	0.9		III
12	7.77	7.72	10.11	1.98	0.00	1.98	27.59	4.60	4.57	5.98	1.17	0.00	1.17	16.32	3.0	1.0		III
13	13.58	20.33	13.71	0.00	0.00	0.00	47.62	8.03	12.02	8.11	0.00	0.00	0.00	28.17	2.0	0.9		II
14	7.80	15.69	13.71	0.00	0.00	0.00	37.20	4.61	9.28	8.11	0.00	0.00	0.00	22.01	2.0	0.9		II
15	4.67	22.15	7.53	0.00	0.42	0.42	34.77	2.76	13.10	4.46	0.00	0.25	0.25	20.57	3.1	0.9		II
16	3.81	27.52	5.22	0.00	0.00	0.00	36.55	2.25	16.28	3.09	0.00	0.00	0.00	21.62	2.0	0.8		II
17	8.31	21.13	2.37	0.00	0.00	0.00	31.81	4.91	12.50	1.40	0.00	0.00	0.00	18.81	2.0	0.7		III
18	8.06	15.73	0.57	0.00	0.28	0.28	24.63	4.77	9.30	0.34	0.00	0.16	0.16	14.57	3.1	0.7		III
19	9.51	7.98	0.43	0.00	0.00	0.00	17.92	5.68	4.77	0.26	0.00	0.00	0.00	10.70	2.0	0.6		III
20	10.27	14.07	4.90	0.00	0.00	0.00	29.25	6.07	8.33	2.90	0.00	0.00	0.00	17.30	2.0	0.7		III

(注) ※2表-7 参照

い場合、ひび割れに囲まれたコンクリート片が落下する可能性が大きくなる。このため、ひび割れ密度によって詳細点検を実施する対象スパンの抽出に利用することが可能である。また、このデータを継続的に取得することでひび割れの進展について定量的に評価していくことも可能となる。

3. 本四道路トンネルにおける健全度評価方法の検討

山田他⁴⁾は2.3に記したように、表-3に示す事象がひとつでもある場合は、トンネル評価点算出シートの点数評価にかかわらず現地で近接・打音検査を実施し詳細に変状を確認することを推奨している。

本四高速では画像による15本のトンネルの健全度評価は初めてであることから、従来方法と比較して今回の計測技術でどの程度の変状が抽出可能か確認することとした。そこで、実際に全面打音検査を実施した岡山管理センターの3つのトンネルと鳴門第二トンネル（上り線）の計7チューブについて、画像判定による変状スパンの抽出結果と打音検査で変状が確認されたスパン数(101スパン)を比較した。その結果、表-3に示す8項目の特記事項に該当する変状が見られたのは52スパンであり、打音検査結果の50%程度であった。画像判定による点検は先行して実施した画像判定結果をスクリーニングし打音検査箇所を絞り込んで点検業務を効率化することも目的としている。そのため、打音検査で発見された変状のうち、特記事項により抽出されなかった変状について分析・整理し以下の項目について新たな着目点として設定することとした。

1) 幅2mm程度のひび割れ

表-3の特記事項では幅2mm程度のひび割れについては対象を長さ3m以上としている。しかし、幅2mm程度のひび割れは、写真-3に示すようにひび割れに沿って浮きや剥離が見られるケースが多かったことやひび割れ幅が測定精度の誤差によって3mmを2mmと過小評価する箇所もあるため取得画像精度も勘案し、ひび割れ延長によらず、幅2mm程度のひび割れがあれば対象箇所として抽出する項目とした。

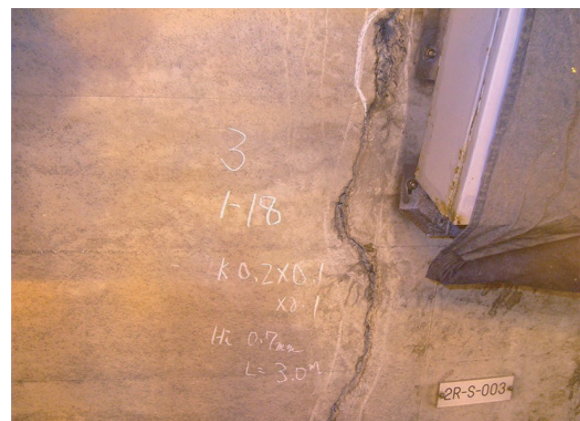


写真-3 ひび割れ2mm部の変状
Photo.3 Cracks with 2mm wide

2) 遊離石灰析出箇所、漏水対策箇所

写真-4に示すように遊離石灰析出箇所では、滴水程度の漏水を伴っている箇所が見受けられた。遊離石灰析出、漏水は、覆工表面の劣化を助長するため漏水の規模（にじみ、滴水など）によらず対象箇所として設定した。



写真-4 遊離石灰析出箇所
Photo.4 Deposit of free lime

3) 覆工コンクリート打設孔跡付近

写真-5のような覆工コンクリート打設孔跡付近では、施工時に生じた豆板や乾燥収縮によるひび割れの発生が多く見られた。このため、対象箇所として設定した。

4) コンクリート補修箇所

漏水対策を行った箇所において、補修材料の経年劣化により、再漏水を伴う箇所が見受けられた。このため、対象箇所として設定した。



写真-5 覆工コンクリート打設孔跡付近の変状
Photo.5 Defects around the concrete placing hole on concrete lining

5) 検査孔・セパ孔等の復旧箇所

写真-6に示すような検査孔やセパ穴、調査孔のモルタルなどによる復旧箇所は、モルタルの経年劣化により剥離するケースが見受けられた。このため対象箇所として設定した。

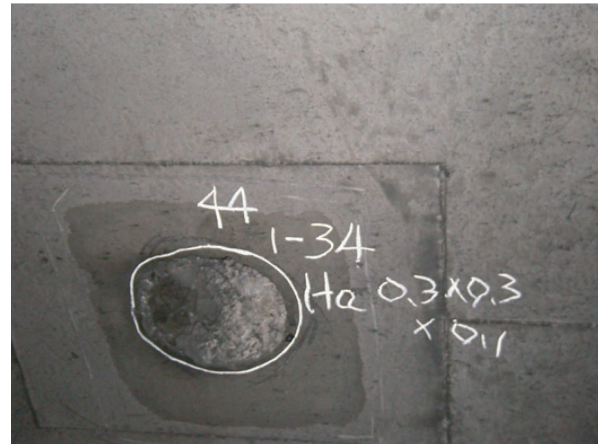


写真-6 検査孔付近の変状
Photo.6 Defects around the inspection hole

以上の着目点は画像から客観的に判定が出来る要素であり、今回、新たに画像判定による特記事項として表-5に示すように変更・追加することとした。これらの特記事項により再判定を実施した結果、抽出された変状スパン数は表-6に示すように当初の52スパンから83スパンとなり検出率は約8割に向上した。未検出の20%程度のスパンの内訳は図-3に示す。ひび割れ幅1mm程度の箇所は全スパンに発生しており、剥落等の判定が困難な変状である。また、鉄筋の露出部は坑口付近のものである。坑口付近は一般的に地山の性状が良好ではないため、補強鉄筋を設置して剛性の高い構造としており、局部的に鉄筋が露出するケースがある。さらに、空洞や異音は画像判定からでは困難な変状である。

このような未検出の変状についての対応として、ひび割れ幅1mm程度の箇所は現場で活用する図-2のひび割れ展開図現地記録・修正シートに表示して、初回打音検査箇所注意してその性状を把握して記録していくことが必要である。

表-5 画像判定における特記事項の変更
Table.5 Revision of special notes for tunnel image evaluation

従前	変更内容	変更後
幅2mm程度のひび割れが3m以上ある	延長規模削除	幅2mm程度のひび割れがある
幅3mm程度以上のひび割れがある	1.と兼ねる	
打継目に三日月型のひび割れがある		打継目に三日月型のひび割れがある
ジェットファン、標識等点が施設周辺に放射状のひび割れがある		ジェットファン、標識等点が施設周辺に放射状のひび割れがある
構造上問題があると診断されるひび割れがある		構造上問題があると診断されるひび割れがある
モルタル系の補修材による既対策箇所がある	材料限定削除	補修箇所がある
豆板(ジャンカ)などがあり、浮き・剥落の危険性がある		豆板(ジャンカ)などがあり、浮き・剥落の危険性がある
既設の点検データより損傷が認められ落下の危険性がある		既設の点検データより損傷が認められ落下の危険性がある
	追加項目	遊離石灰、漏水箇所
	追加項目	打設孔跡周辺に豆板があり、浮き・剥離の危険性がある
	追加項目	検査孔、調査孔、セパ孔等の復旧箇所において、浮き・剥離の危険性がある

表-6 特記事項変更前後の近接・打音検査対象スパン抽出状況

Table.6 Span extraction before and after revision of special notes

路線名	トンネル名称	区分	延長 (m)	覆工 スパン数	打音点検で変状 が発見されたスパン 数	当初			特記事項変更後		未検出 スパン数
						画像判定による打音 点検対象スパン			画像判定による打音 点検対象スパン		
						スパン数	スパン	抽出率	スパン	抽出率	
神戸淡路鳴門自動車道	第二鳴門トンネル上り	上り	353	35	27	12	44.4%	18	66.7%	9	
瀬戸中央自動車道	正面山トンネル	上り	538	54	14	8	57.1%	14	100.0%	0	
		下り	538	53	25	13	52.0%	22	88.0%	3	
	柳田トンネル	上り	387	38	15	8	53.3%	12	80.0%	3	
		下り	331	33	8	4	50.0%	6	75.0%	2	
	塩生トンネル	上り	408	40	9	4	44.4%	8	88.9%	1	
合計				292	101	52	51.5%	83	82.2%	18	

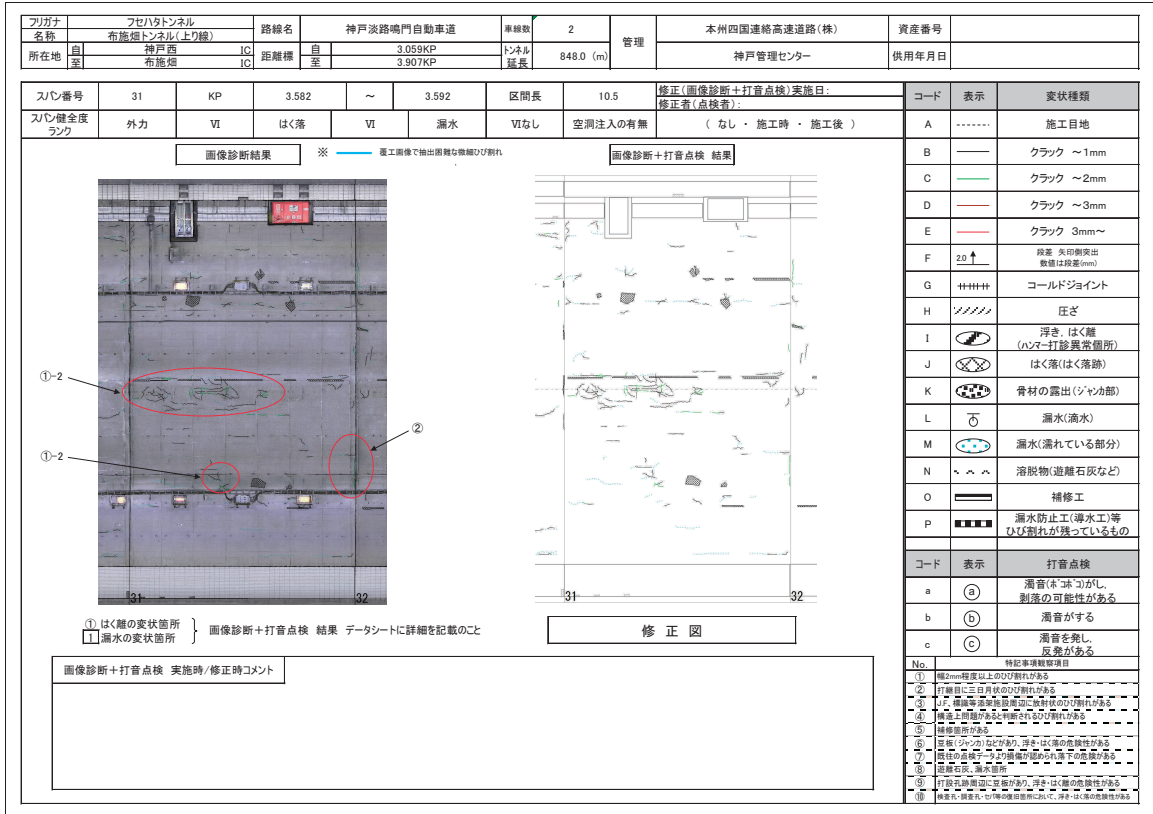


図-2 ひび割れ展開図現地記録・修正シート

Fig.2 Crack map and tunnel inspection sheet

坑口部（坑口～30m程度）は、画像評価により抽出されない場合でも打音検査により確認する事が必要と判断し打音検査の対象とすることとした。

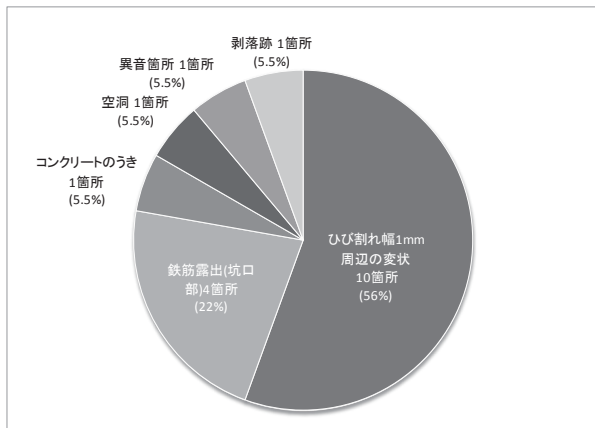


図-3 画像判定による未検出変状内訳

Fig.3 Summary of undetected defects by image evaluation

4. 本四道路トンネル覆工コンクリートの健全度

4.1 トンネル画像判定結果の記録

新たに設定した「画像判定における特記事項」の適用により、本四道路の道路トンネルの覆工画像からひび割れ等の変状についてスパンごとに定量評価し近接・打音検査を実施すべき箇所を抽出した、さらに近接・打音検査実施時に利用できる各スパンのひび割れ展開図現地記録・修正シート(図-2)を作成した。このシートは1スパンごとに比較の変状が多い打継目の両端50cmを含む位置までを対象とし、取得画像から判定された先行判定項目の該当箇所やひび割れ密度、規模等のスパン全体の健全度評価結果を記録したものである。トンネルの近接・打音検査時にはこの記録シートを現地に持参して該当箇所の点検を実施し、このシートに点検結果を記録しデー

タを蓄積しておくこととなる。

4.2 ひび割れ密度評価

画像判定結果に基づいて、本四道路の道路トンネルについて健全度の判定を実施した。取得した画像から得られた覆工コンクリートのひび割れを、ひび割れ集計一覧表として整理した。覆工コンクリートに発生したひび割れは、コンクリートの劣化を促進することからトンネル健全度を測る指標として利用ができるため、この数値を用いて健全度を定量的に評価することが可能である。また、表-7にNEXCO保全管理要領⁶⁾に示されているひび割れ密度による補修ランクの判定基準を示す。図-4に15トンネル(22チューブ)の各チューブ毎の平均ひび割れ密度を示す。

補修ランク I のトンネルは無いが、川井谷トンネル上り線(完成2009年)、第一鳴門トンネル上下線(完成1987年)の3チューブが補修ランク II に分類される。今後、補修ランク II に分類されたトンネルは詳細点検のうエコンクリート剥落対策等を検討する必要がある。

4.3 トンネル近接・打音検査実施優先度

各トンネルの健全度評価の結果、抽出された近接・打音検査対象スパン数と全スパン数に対する比率を表-8に示す。近接・打音検査を必要とするスパンは本四道路のトンネルの全スパンの約7割となった。また、横軸に対象スパン比率を、縦軸に対象スパン数を取り、各トンネルについてプロットしたものを図-5に示す。このグラフにおいて、右上のゾーンに位置するトンネルは近接・打音検査の優先度が高い。これは、延長方向に連続して多くの変状が抽出されている場合には、第三者へ与える事象が発生する確率が高いという考えに基づいている。この結果からみると、舞子トンネルはひび割れ密度による健全度評価では補修ランク III であるが、健全度評価によって特記事項として抽出された近接・打音検査該当スパンが多いため他のトンネルに比べ優先度が高いトンネルと言える。

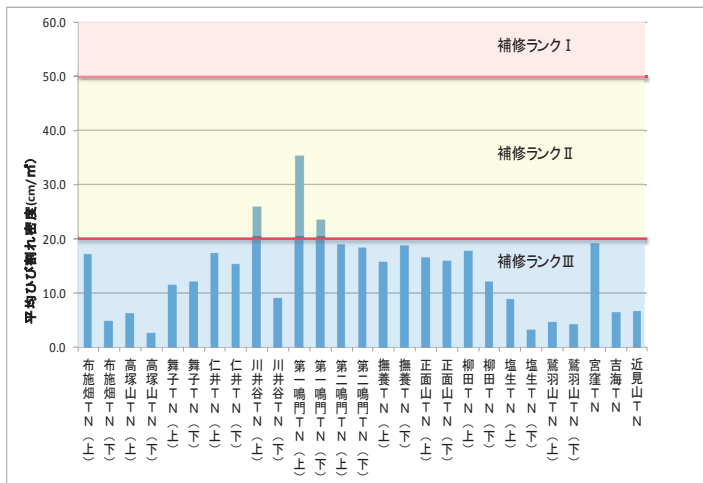


図-4 各トンネルの平均ひび割れ密度
Fig.4 Average crack density of each tunnel

表-7 ひび割れ密度による補修ランク⁶⁾

Table.7 Maintenance rank based on crack density

補修ランク	内容	ひび割れ密度
I	通行車両の安全に対して危険の状態であり、早急に何らかの補修が必要なもの	50cm/m ² 以上
II	通行車両の安全に対して、近い将来危険な状態になることが予想される、もしくは美観上の問題により計画的に補修が必要なもの	20~50cm/m ²
III	早急な補修は必要としないが、材料劣化などが認められ監視及び場合によっては軽微な補修が必要なもの	20cm/m ² 以下

表-8 詳細点検該当スパン数及びスパン比率

Table.8 Ratio and number of spans associated with detail inspection

トンネル名	延長(m)	全体スパン数	詳細点検実施対象スパン	
			スパン数	比率(%)
布施畑TN(上)	848	83	75	90.4%
布施畑TN(下)	854	85	35	41.2%
高塚山TN(上)	1,210	119	103	86.6%
高塚山TN(下)	1,181	116	51	44.0%
舞子TN(上)	3,290	340	295	86.8%
舞子TN(下)	3,250	325	259	79.7%
仁井TN(上)	378	36	30	83.3%
仁井TN(下)	429	41	36	87.8%
川井谷TN(上)	260	26	26	100.0%
川井谷TN(下)	260	26	20	76.9%
第一鳴門TN(上)	191	24	24	100%
第一鳴門TN(下)	201	20	20	100%
第二鳴門TN(上)	352	35	18	51.4%
第二鳴門TN(下)	374	36	36	100%
撫養TN(上)	770	74	74	100%
撫養TN(下)	616	59	58	98.3%
正面山TN(上)	538	54	14	26%
正面山TN(下)	538	53	22	42%
柳田TN(上)	387	38	12	32%
柳田TN(下)	331	33	6	18%
塩生TN(上)	408	40	8	20%
塩生TN(下)	401	39	3	8%
鷺羽山TN(上)	205	19	13	68.4%
鷺羽山TN(下)	205	19	17	89.5%
宮窪TN	1,420	142	122	85.9%
吉海TN	356	36	23	63.9%
近見山TN	1,138	119	64	53.8%
合計		2,037	1,464	71.9%

5. おわりに

今回、トンネル点検の手法として走行型計測車両によって取得した画像により変状を数値化した。数値化されたデータは定量的な評価手法による判定が可能となる。本四道路トンネルの画像取得による点検手法は今回の計測が初回であるため、一部のトンネルでは全てのスパンの打音検査が必要と判断されたトンネルもあるが、これ

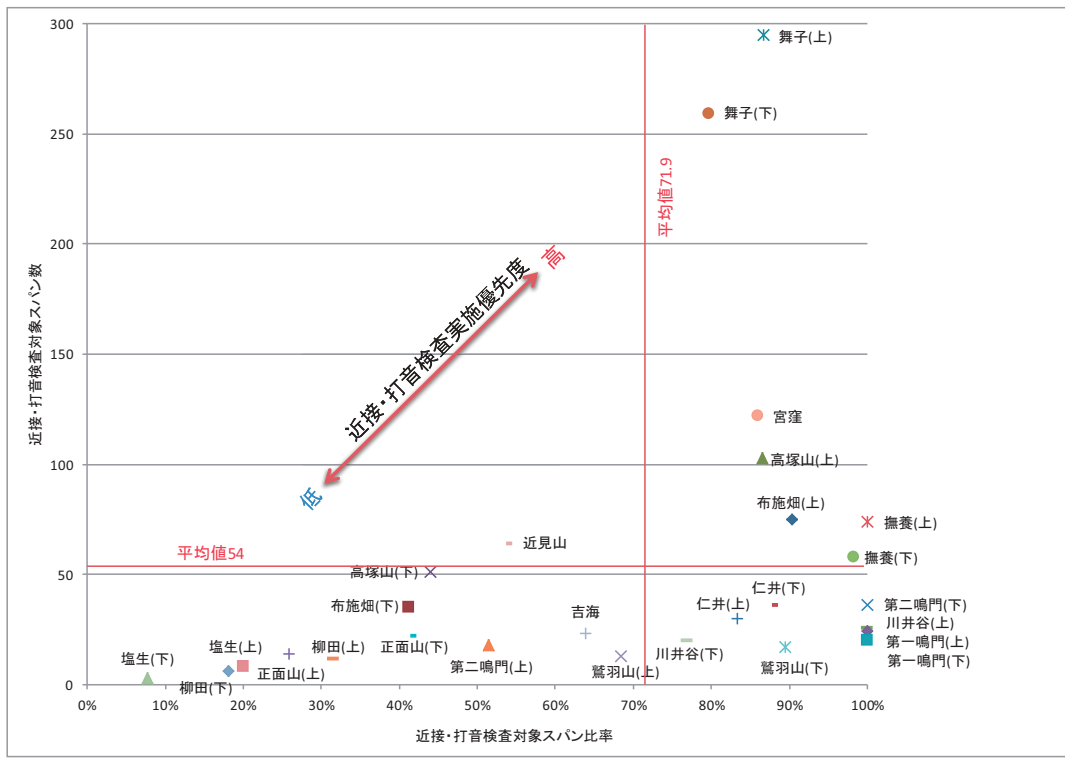


図-5 近接・打音検査点検実施優先度評価
Fig.5 Priority of in-depth inspection

らについては詳細点検の実施結果を記録することで、次回測定時の画像判定で進展がなければ省略を検討することも可能となり現地作業の効率化が期待される。また、これまで暗い坑内環境化で実施していた目視点検を省略し鮮明な画像により机上での確認も可能となった。点検の高度化、効率化のため変状を数値化し定量評価を行う手法は有効な手段であり、ヒューマンエラーの防止にもつながると考えられる。今後も点検管理業務の効率化・高度化に向けた取り組みを行っていくことが必要である。

参考文献

- 1) 平成22年度瀬戸中央自動車道道路修繕工事トンネル覆工コンクリート詳細点検 報告書、本州四国連絡高速道路株, 2010
- 2) トンネル覆工コンクリート計測業務 報告書、本州四国連絡高速道路株, 2011
- 3) トンネル覆工コンクリート表面変状展開図作成業務 報告書、本州四国連絡高速道路株, 2011
- 4) 山田隆昭、佐野信夫、馬場弘二、吉武勇、中川浩二、西村和夫：トンネルコンクリートの定量的な健全度評価基準 土木学会論文集、Vol63, No.1, 86-96, 2007.3
- 5) 東・中・西日本高速道路株式会社：設計要領 第三集 トンネル編, 2009
- 6) 東・中・西日本高速道路株式会社：保全点検要領, 2006

海外報告（バングラデシュの道路・橋梁事情）

Overseas Report (Roads and Bridges in People's Republic of Bangladesh)

しまなみ今治管理センター 技術管理役 伊藤 豊 秋
(前) 国際協力機構 (JICA) 長期専門家 Toyoaki Ito
(バングラデシュ 運輸省 道路局)

1. はじめに

2009年12月から2012年5月末までの約2年6カ月の間、JICA 長期専門家(道路・橋梁維持管理アドバイザー)としてバングラデシュ人民共和国(以下「バ国」という)に赴任した。バ国の運輸省(Ministry of Communication, MoC)配下の道路局(Roads & Highways Department, 以下「RHD」という)において幹線道路及び橋梁の維持管理について技術協力・指導を行うとともに、バングラデシュ橋梁公団(Bangladesh Bridge Authority, BBA)においてパドマ橋プロジェクト及びジャムナ橋の補修についても技術協力を実施した。

本稿ではバ国の道路、橋梁のインフラ状況を紹介しながら現況と問題点について述べる。

2. バングラデシュの概要

バングラデシュは、南アジア、インド亜大陸の北東部に位置している。周囲はインドと国境を接し(南部の一部はミャンマーと国境を接している)、南はベンガル湾に面している。(図-1) 国土全体が、ジャムナ川、パドマ川、メグナ川及びその支流で形成されたデルタ地帯であり、国土の80%は標高9m以下である。南部のチッタゴン及び北部のシレット付近には丘陵地帯が一部見られる。

気候は亜熱帯モンスーン気候であり、一般に高温多湿である。夏季(3月～5月)及び雨季(6月～9月)に降雨が集中する。4月～5月が最も暑く、気温が40度を超えることも珍しくない。一方、12月～2月の夜間には気温が5、6度まで下がる。

バ国は、パキスタンから1971年に独立した若い国である。不安定な政情、洪水、サイクロンなどの自然災害にたびたび見舞われるなど苦難の歴史を歩んで来た。また、日本の4割ほどの国土(14万平方km)に日本の1.3倍の人口(約1億4千万人)を抱え、人口の半数近くが貧困層に属しており、最貧国の代名詞となって来た。このため、日本のほか、国連(UN)、世界銀行(WB)、アジア開発銀行(ADB)などの国際機関をはじめとして多くの国々が援助の手を差し伸べてきた。近年、豊富で安価な労働力が注目され、主に外資により欧州向けの繊維製品を中心に生産が拡大し、毎年5～8%の驚異的な経済成長を遂げている。しかし、ほぼ毎日計画停電があるなど慢性的な電力不足に悩まされている

ほか、都市部での交通渋滞、社会インフラの未整備など数多くの問題を抱えながらも経済成長を遂げている。

このほかにも政治家・公務員のコンプライアンスの欠如、都市への人口流入(スラム街の拡大)、環境汚染、貧富の格差拡大など数多くの問題を抱えており、順調に発展しているとは言い難い面があることも事実である。



図-1. バングラデシュの位置

Fig-1. Location of Bangladesh

3. バングラデシュの道路事情

バングラデシュは、1971年の独立以降は主に国際機関や諸外国の援助により道路網を整備してきた。バ国の幹線道路は、首都ダッカと主要都市を結ぶ国道(National Highway)、地方の中心都市間を結ぶ地域間幹線道路(Regional Highway)、それに幹線道路と郡(ジラ)の中心地等を結ぶジラ道路(Zilla Road)の3種類に分類される。それぞれの道路延長は表-1. に示すとおりである。また、このほかに地方工部局(Local Government Engineering Department)が管理する地方道、農道が約220,000kmある。

表-1. 幹線道路の内訳

Table-1. Contents of Road Network

道路種別	路線数	道路延長(km)
国道 National Highway	68	3,492
地域間幹線道路 Regional Highway	116	4,254
地方道 Zilla Road	619	13,275
合計	804	21,021

ダッカ周辺の幹線国道は、一部4車線化されているが、ほとんどの幹線道路は対面2車線である。バ国第一の港湾都市であるチッタゴンと首都ダッカを結ぶ国道1号線(N-1)では4車線化プロジェクトが進行中であるが、数年前に工事契約が締結されたもののほとんど進捗していない。バ国の交通事情の特色として挙げられるのが多様な車両である。庶民の足は、バスの他にリキシャと呼ばれる自転車タクシー(写真-1)や小型のオート三輪タクシー(燃料に天然ガスを使用していることからCNGと呼ばれる)であり、このほかに大八車の類、トラック、二輪車なども多数混入している。経済成長に伴い一般車両が急激に増加しており、交通渋滞が慢性化し、大きな社会問題となっている。

(写真-2.)



写真-1. 庶民の足「リキシャ」

Photo-1. Rikishaws



写真-2. 首都ダッカの交通渋滞

Photo-2. Traffic congestion in Dhaka

4. バングラデシュの橋梁事情

4.1 一般

RHDが管理する橋梁は約4,800橋であり、その6割がRC桁橋である。また、仮設橋であるベイリー橋も約1,000橋ほどもある。

RHDが作成した道路マスタープランでは段階的にベイリー橋やパキスタン統治時代に建設された施工不良の橋梁を架け替えていくことになっているが、慢性的な予算不足もあり、計画どおりには進んでいないのが実態である。(写真-3.)

バ国に限ったことではないが、発展途上国では過積載車が横行している。バ国では1回/月程度の頻度でベイリー橋の落橋事故が報告されている。構造的な問題もあるが、主原因は過積載車の通行である。このため、特にベイリー橋については軸重制限の表示をして道路利用者に注意喚起を促すように指示をしているところである。

また国土全体に無数の河川が存在しており、幹線道路であっても橋梁整備が追いついていない箇所が地方部には多く存在する。このような箇所についてはRHDが有料フェリーを運航している。(写真-4.)

20世紀末までにバ国の道路網は、ほぼ整備されたが、増加する交通量に内容が追いついていないのが実態である。これにはRHDの有料道路の通行料、フェリーなどの事業収入が一般会計に吸い上げられ、道路特定財源になっていないなどの問題も指摘されている。表-2にRHDが管理する橋梁内訳を示す。



写真-3. ベイリー橋

Photo-3. Bailey Bridge



写真-4. RHDが運航するフェリー

Photo-4. Ferry Boat operated by RHD

表-2. 橋梁内訳

Table-2. Quantity of Each Bridge Type

橋種	橋数	割合 (%)
RC橋	2,949	61%
鋼桁橋	230	5%
鋼トラス橋	240	5%
PC橋	410	8%
簡易橋 (ベイリー橋)	1,000	21%
合計	4,829	100%

4.2 橋梁分野における日本の技術協力

バ国には、前述のどおり三大国際河川が国土を4分割していることから、三大河川を横断する長大橋梁が必要であった。

我が国の無償援助で建設したメグナ橋、メグナ・グムテイ橋をはじめとして、我が国は各長大橋梁のプロジェクトに協力しており、バ国の国土建設に多大な貢献をしてきた。このほかにも長大橋の取付け道路における中小橋梁、洪水等で被災した中小橋梁の復旧なども行っている。我が国が協力した主な橋梁を表-3に示す。また、各橋梁の位置を図-2に示す。

表-3. 日本が協力した主な橋梁

Table-3. Major Bridges cooperated with Japan

橋名	完成年	橋長	形式	協力形態
メグナ橋	1990年	930m	有ヒンジ PC箱桁橋	無償
メグナ・グムテイ橋	1995年	1,410m	有ヒンジ PC箱桁橋	無償
ジャムナ橋	1998年	4,800m	PC箱桁橋	有償
パクシー橋	2004年	1,786m	PC箱桁橋	有償
ルプシャ橋	2004年	1,360m	PC箱桁橋	有償

4.3 主要橋梁の現況と今後について

(1) メグナ橋及びメグナ・グムテイ橋

両橋は、我が国の無償援助によって1990年及び1995年に完成した有ヒンジPC箱桁橋である。両橋はカンチレバー形式であり、互いのカンチレバーを中央で連結している。両橋は、チッタゴンと首都ダッカを結ぶ国道1号線上にあり、対面2車線しかないこと、代替路線がないことから交通が集中している。また、十分な維持管理がなされていないこともあり様々な変状が見られる。

・ ヒンジ部の損傷

ほぼ全てのヒンジでゲレンク杓のゴムパッドが損傷しており、オスヒンジとメスヒンジの間に隙間が生じ、車両走行時に衝撃音が生じていた。またオスヒンジの下杓が欠落している箇所も多数見受けられた。このため、本復旧までの応急処置として隙間にゴム板と鉄板を挿入した。(写真-6.)

・ 伸縮装置の損傷

ヒンジ部の損傷が主原因であると考えられるが、伸縮装置についても後打ちコンクリートが破損しているほか、伸縮装置が著しく損傷しており交換する必要がある。しかし、日本製の耐久性に優れた伸縮装置が調達できないため、緊急避難的に鉄板で保護するように指示している。

・ 下部工の洗掘問題

メグナ橋では、チッタゴン側の4橋脚の洗掘が著しく場所打ち杭が数m露出している状態である。継続的に深淺測量を行い経過観察するとともにバン格拉デシュ工科大学(BUET)と意見交換をしながら対応策を協議している。

・ 耐震補強の必要性

両橋の設計では”Bangladesh National Building Code (BNBC)”により設計水平震度(Kh)を0.05(Liable to moderate zone)としていた。その後、1993年にBNBCが改定され、当該地域におけるKhは0.15に変更された。全国的な問題であるが、改定されたBNBCに適合すべく1993年以前に設計された中部以北の橋梁については両橋を含めて耐震補強を行う必要がある。

・ 船舶緩衝工の必要性

バ国においては、河川を利用した内陸水運が全輸送量の約8%を占めている。メグナ川は主要河川でもあり、航行船舶も多い。しかしながら操船技術の未熟さもあり、橋脚には船舶が接触した形跡が多数見られる。このことから中央部の橋脚には船舶緩衝工が必要であると進言している。

・ 第2メグナ橋及び第2メグナ・グムテイ橋について

メグナ橋及びメグナ・グムテイ橋は、2車線しかなく日交通量が17,000台以上に増加し、限界に近い状態である。また前述のような損傷もあり、両橋共、大規模なリハビリ工事が必要である。また国道1号線(N-1)は全体的に4車線化工事が進められているが、両橋の区間だけは4車線化のめどが立っていない。現在、JICAの要請で両橋のリハビリ+第2橋の実行可能性調査(F/S)を本四OBを中心メンバーとしたチームで実施中であり、今年度末には今後の方向性が決まる予定である。



写真-5. メグナ橋 (現地スタッフと筆者)

Photo-5. The Meghna Bridge



写真-6. ヒンジ部の応急補修

Photo-6. Temporary repair at hinge bearing

(2) ジャムナ橋

ジャムナ橋は、道路4車線のほか、鉄道単線、高圧送電線、ガス管が添架された多目的橋であり、世界銀行(WB)、アジア開発銀行(ADB)と我が国を中心とした資金協力により1998年に完成したPC箱桁橋である。(写真-7)同橋は、バ国一の長大橋であり、100タカ紙幣の図柄にも使われているなど、バ国を代表する橋梁の一つである。

道路と鉄道が同一面上にあり、設計上の懸念から橋面舗装がなされていないまま10年以上も供用されてきた。しかし、2006年頃、橋面上にクラックが発見され、マスコミが報道したことから大問題となった。バ国政府は委員会を立ち上げ、原因を設計・施工に問題があると結論付けた。しかし、施工業者、出資者がこれに異を唱え、議論は平行線をたどった。紆余曲折があったが、結局、同橋を管理するバングラデシュ橋梁公団(BBA)がクラック補修及び橋面舗装を行うことに落ち着いた。現在、バングラデシュ工科大学(BUET)の学識経験者が施工管理委員会を組織し、その監督下で中国企業が施工している。(平成24年5月時点)



写真-7. ジャムナ橋

Photo 5. The Jamuna Bridge

4. 4 橋梁の維持管理について

RHDは、維持管理の重要性について認識しているというものの実行が伴っていなかった。橋梁維持管理システム(Bridge Maintenance Management System)のデータは2004年に同システムが立ち上げられてから全く更新されておらず、データ自身も怪しいものが多数見られた。RHDはJICA専門家が提案した橋梁点検マニュアル(Bridge Condition Survey Manual)によってRHDが管理する全橋梁を再点検し、橋梁維持管理システム(BMS)データを更新することになった。今秋にRHD内に専門の部局を立ち上げ、実施する予定である。

4. 5 パドマ橋プロジェクト

パドマ橋は、首都ダッカと東インドの大都市、コルカタを結ぶ国道8号線(N-8)上のパドマ川(インドではガンジス川)に架橋予定の道路・鉄道併用橋である。このルートは物流の大動脈であるにも関わらず、パドマ川においてはフェリーで渡河しなければならず、交通上のネックとなっている。このため、パドマ橋建設はバングラデシュの悲願となっている。パドマ橋の概要を表-4に示す。パドマ橋は日本と世界銀行(WB)、アジア開発銀行(ADB)が中心となって事業を進めており、総事業費29.2億USドルのうち、WB,ADB,日本の3者で約20億USドルを融資し、残りをバングラデシュ政府が調達する枠組みになっている。日本は実行可能性調査(F/S)を実施したほか、パドマ橋プロジェクト有識者委員会には日本側から藤野東大教授(上部工)、石原東大名誉教授(下部工)が参加するなど多大な貢献をしている。パドマ橋の建設によって、バ国西部の開発・発展、東西方向の物流の迅速化・効率化など大きな効果が期待されている。しかしながら、事業費の約40%を出資する予定の世界銀行(WB)とバングラデシュ側でコンプライアンスの問題が発生し、詳細設計は完了したものの入札スケジュールは大幅に遅れている。

表-4. パドマ橋概要

Table-4. Outline of the Padma Bridge

項目	細目	備考
橋長	6.15km	本橋のみ 150m@41径間
上部工	鋼トラス橋	ダブルデッキ構造 桁高 H=13.5m
下部工	鋼管杭基礎	42基
道路	4車線	
鉄道	単線載荷	インド高速貨物鉄道基準
総事業費	29.2億USドル	取付道路、護岸工含む
取付道路	15.1km	両側合計
護岸工	14.5km	右岸、左岸共
料金所	2か所	
添架物	高圧電力ケーブル ガス管 光ファイバー	



図-2. パドマ橋架橋地点及び主要橋梁位置

Fig- 2 Locations of the Padma Bridge and other major bridges in Bangladesh



図-3. パドマ橋 (完成予想図 一鳥瞰図一)

Fig.3 The Padma Bridge
(Perspective drawing 一Bird's eye view)



図-4. パドマ橋 (完成予想図)

Fig.4 The Padma Bridge (Perspective drawing)



写真-8. 日本が援助した簡易橋を利用する子供たち

Photo-8. Bangladesh children passing on the portable steel bridge donated from Japan

5. おわりに

2012 年は、バングラデシュと日本が国交を樹立して 40 周年にあたる記念すべき年である。バングラデシュ、日本両国においても、いろいろな記念行事が開催されている。これは両国が 40 年にわたり良好な関係を築いてきた証である。バングラデシュ人は一般に穏健であり親日的である。我が国は過去 40 年にわたり、バ国に対して多方面にわたり様々な援助・協力をしており、バ国の国づくりに多大な貢献をしてきた。

しかし、バ国は順調に経済成長を遂げているとは言え、貧困層が国民の約 4 割を占めるなど依然、貧困問題は深刻である。そのほかにも電力不足、インフラの未整備、コンプライアンスの欠如、教育、保健、医療、環境、防災など問題山積の状態であり、緊急に解決すべき問題も多い。

道路インフラ面では、筆者の後任である長期専門家も継続して派遣されており、本四 OB もコンサルタントとして現地で活躍している。やるべきことは山積しており、今後も息の長い継続的な協力が必要である。バ国の道路インフラが少しずつでも改善されバランスのとれた発展をすることを願う次第である。なお、筆者のバングラデシュ在勤中は、在バングラデシュ日本大使館、国際協力機構 (JICA)、本四高速の皆様をはじめとして在バングラデシュ在留邦人、RHD 職員の方々など多くの方々にお世話になった。ここに紙面をお借りして厚く御礼申し上げたい。

参考文献

- 1) 伊藤豊秋 : バングラデシュにて—2011 年夏—、国際建設技術情報、No.821,2011.04
- 2) 栗原敏広 : 成長する「最貧国」、国際建設技術情報、No.804,2009.11
- 3) 西谷雅弘 : 海外報告 (バングラデシュ事情)、本四技報、Vol.30, No.107, 2006.9

マスコンクリート塗装の健全性調査

Study on Soundness of Coating for Mass Concrete Structures

長大橋技術センター 総括・防食グループ リーダー 荻原 勝也
 Katsuya Ogihara
 神戸管理センター 計画課長 古村 学
 (前)長大橋技術センター 総括・防食グループ サブリーダー Manabu Komura
 長大橋技術センター 総括・防食グループ サブリーダー 花井 拓
 Taku Hanai

1. 調査目的及び経緯

海峡部橋梁の下部構造は大規模なマスコンクリート構造物であるため、コンクリート硬化時の発熱や乾燥収縮によるひび割れの発生を皆無にすることは不可能である。また、これらの構造物は海洋環境下にあるために海から飛来する海塩粒子によって塩害が生じやすく、特にひび割れの存在はこのような劣化要因をコンクリート内部に誘導してしまう可能性を高めることになる。こういった理由などから、本州四国連絡橋の多くの下部構造には、コンクリート塗装などによる防食が施されている。マスコンクリート塗装に求められる性能については、施工当初よりさまざまな材料試験や長期暴露試験などを通じて検証を続けているところであり、平成5年度にはそのような調査結果を踏まえて要求性能を提示した「海峡部橋梁マスコンクリート塗装基準(案)」(以下、「基準(案)」という)の提案に至っている¹⁾。本基準(案)に示される塗装の耐久性については継続的な調査が実施されている²⁾が、実環境における長期の耐久性については、今後も更なる検証が必要である。また、今後劣化が生じた塗装については、随時補修を行っていく必要があるが、このような補修方法についても合理的な手法の確立が求められている。

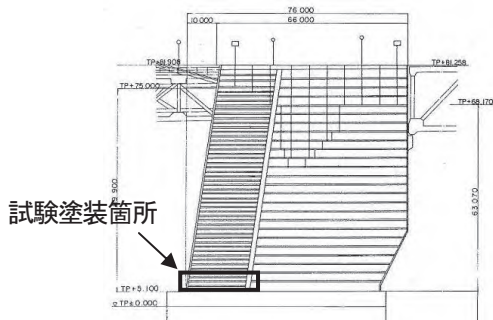


図-1 南備讃瀬戸大橋 7A 試験塗装位置図
 Fig.1 Location of Test Coating (7A of Minami Bisan-Seto Bridge)

以上のような背景から、過去に実施した試験施工も含めたマスコンクリート塗装の健全性の調査を実施することとしている。この検証結果を用いて、新設時のみならず、維持管理段階においても活用できる基準の策定を検討している。本報では、平成23年度に実施した調査内容について報告する。

2. 調査内容

2.1 南備讃瀬戸大橋7A試験塗装健全性調査

南備讃瀬戸大橋7A西側基部では、マスコンクリート塗装の長期耐久性を確認するため、6種類の塗装について平成元年度に試験塗装を行い長期暴露を行っている(図-1)。平成23年度は、これら6種類の塗装のうち、表-1に示す3種類の塗装について調査を実施した。調査内容は、基準(案)に規定されるひび割れ追従性、遮塩性、コンクリートとの付着性に加え、外観変状とした。

表-1 南備讃瀬戸大橋7A試験塗装仕様

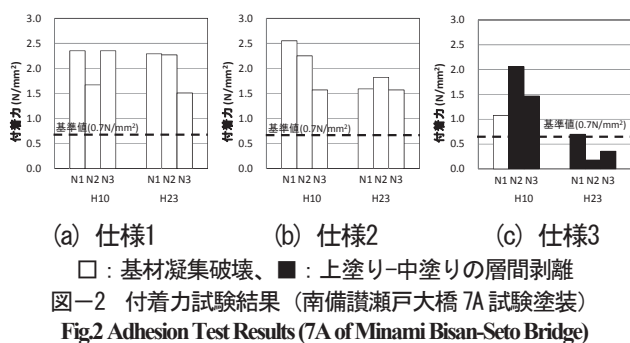
Table 1 Specification of Test Coating (7A of Minami Bisan-Seto Bridge)

番号	仕様	総膜厚(μm)
1	ポリブタジエン+ふっ素	560
2	同上	1060
3	アクリルゴム+ウレタン	1100

塗膜の付着力について調査した結果を図-2に示す。同図には、平成10年度に実施した結果についても合わせて示す。

ポリブタジエン系については、前回の調査と比較して付着力の低下がみられるが、いずれの仕様でも基準(案)に規定される、付着力(0.7N/mm²、初期)を満足する結果となった。一方、アクリルゴム系の仕様3については、付着力が規定値を下回る結果となったが、これらの破壊形態は上塗り-中塗り間の層間剥離であり、基

材自体のコンクリートへの付着力については確認できなかった。



遮塩性試験では、ほとんどのサンプルで、基準(案)に規定される、塩素イオン透過量 $10^3\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日}$ を満足したが、仕様1の1サンプルで $3.8 \times 10^3\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日}$ という結果となった。

ひび割れ追従性確認のための伸び率試験(ゼロスパン試験)では、基準(案)の規定が、2.0mm(初期塗膜)、1.5mm(促進耐候性試験後)であるのに対し、仕様1で1.0mm程度となった以外は、1.5~4.4mmと、20年以上暴露された塗膜としては良好な伸び性能を有していることが確認された。

外観変状としては、それぞれの仕様において前回調査時との変化はあまり確認されなかったが、アクリルゴム系の仕様3において、上塗りの剥がれが数か所確認された。

2.2 多々羅大橋2P、来島海峡大橋8P塗装健全性調査

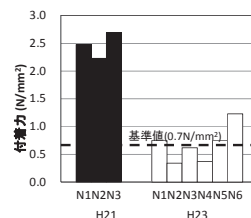
本州四国連絡橋のマスコンクリートとして最後の完成となった多々羅大橋(2P)と来島海峡大橋(8P)のマスコンクリート塗装について、南備讃瀬戸大橋7A試験塗装と同様の調査を実施した。これらの塗装仕様について表-2にまとめる。いずれの基礎についても、塗装は平成10年に施工されている。

表-2 多々羅大橋2P、来島海峡大橋8P 塗装仕様
 Table 2 Specification of Coating (2P of Tatara Bridge and 8P of Kurushima-kaijyo Bridge)

基礎	仕様	総膜厚(μm)
多々羅2P	アクリルゴム+ウレタン	1120
来島8P	超速硬性ウレタン	1050

多々羅大橋2Pにおいては、付着力、伸び率については、基準(案)の規定値を満足するものであったが、付着力試験の破壊形態は、南備讃瀬戸大橋7A試験塗装の仕様3同様、上塗り-中塗り間の層間剥離であった。遮塩性については、約 $2.5 \times 10^3\text{mg}/\text{cm}^2 \cdot \text{日}$ であり、基準(案)の規定値よりは大きめの値となった。外観変状としては、塗装ムラに沿った上塗り材の割れや剥がれが確認されている。

来島海峡大橋8Pの付着力試験の結果を図-3に示す。平成21年度の調査では、破壊形態がプライマー層間剥離であり高い付着強度を示したのに対し、平成23年度の調査では、全てが基材凝集破壊となっており、破壊形態に相違が見られた。このため、平成23年度の調査結果では、基材自体のコンクリートへの付着力については確認できなかった。



□ : 基材凝集破壊、■ : プライマー層間剥離
 図-3 付着力試験結果 (来島海峡大橋 8P)
 Fig.3 Adhesion Test Results (8P of Kurushima-Kaijyo Bridge)

来島海峡大橋8Pの遮塩性は基準(案)の規定値を満足するものであった。また伸び率試験においては基準(案)の規定値を大きく上回ったが、試験中に塗膜と試験板間に浮きが生じてしまいゼロスパンの試験条件が確保されなかったため、参考値としての扱いとせざるを得ない。当該材料については、今後試験方法の検討が必要である。

3. まとめ

今回の調査結果からは、本州四国連絡橋の下部構造で実績の多い、ポリブタジエン系やアクリルゴム系の塗装仕様が比較的長期の耐久性を有していることが確認されたが、アクリルゴム系については、上塗り-中塗り間の付着力低下が確認されている。

今回比較の対象として用いた基準(案)の規定値とその試験方法はあくまで新設時の仕様のためのものであり、既設塗装評価に適用するように提案されているものではない。今回の調査対象以外の箇所でも、基準(案)に示される規定値を満足する場合でも変状が確認されている報告もあり、今後は既設塗装の性能を評価する指標についても検討していく必要がある。

今回の調査にあたっては、神戸大学森川英典教授からご助言・ご指導をいただきながら実施した。

参考文献

- 1) 野村直茂、森下尊久：マスコンクリート塗装に関する調査(その2)、本四技報、Vol.19No74、pp2-9、1995.4
- 2) 川上賢明、大西貴浩：マスコンクリート塗装に関する調査及び調査、本四技報、Vo.25No.96、pp8-15、2001.4

動態観測の成果と更新計画

Observation Results and updating plan of the bridge monitoring system

長大橋技術センター 耐風・耐震グループリーダー

福永 勸
Susumu Fukunaga

1. 研究目的及び経緯

我が国は台風、地震の常襲地域に位置しており、本四連絡橋は、諸外国に比べ高い設計外力で設計が行われた。長大橋に作用する外力及び橋体応答については、未解明な部分が多いことから、耐風及び耐震設計においては、種々の仮定が設けられている。それらの仮定の妥当性を検証するために、本四連絡橋の多くの長大橋に対しては起振機を用いた振動実験が行われ、設計上の仮定の一部についてはその妥当性の検証が行われている。しかし、明石海峡大橋においては、その橋梁規模が非常に大きなものとなったため、起振機を用いた振動実験は実施されていない。

本四連絡橋においては、このような設計上の各種仮定の妥当性の検証や、大規模外力作用時の橋体の安全性を評価するために、主要な橋梁に動態観測設備を設置し、台風時及び地震時の実橋観測を実施している。

本四連絡橋の3ルート completion から10年以上が経過し、計測機器の更新時期を迎えたことを踏まえ、これまでの観測で蓄積された動態観測記録のとりまとめを行い、動態観測の更新計画を作成した。

2. 設計検証に関わる検討結果

2.1 風時の明石海峡大橋での検討

台風時の特徴的な自然風記録の分析を行った。自然風の気流のパワースペクトルは、明石海峡大橋耐風設計要領¹⁾に規定された日野式によるスペクトルとカルマン型スペクトルに概ね一致することを確認した。ただし、気流の乱れ強さが小さい場合においては、乱れ強さを10%と仮定している日野式は実測値と整合しない結果となった。また、自然風の空間相関は、明石海峡大橋耐風設計要領に規定されたダavenport式（指数関数式）より、カルマン型の空間相関係数と概ね整合する結果となった。このため、明石海峡大橋のような長周期構造物のガスト

応答において支配的となる低振動数領域での空間相関は安全側の仮定となっていると考えられる²⁾。

補剛桁の動的特性について、常時微動データ及び強風時データの分析（RD（Random decrement）法とERA（Eigensystem realization algorithm）法）を行った。補剛桁の固有振動数は、設計値とほぼ整合する結果となったが、ねじれモードの固有振動数は若干大きめの値であった。構造減衰も、設計値とほぼ整合する結果となったが、水平モードの構造減衰はかなり大きい可能性があることが分かった³⁾。

補剛桁の強風時の応答について、平均風速と補剛桁橋軸直角方向水平変位の関係を分析した。補剛桁の平均応答は設計値とほぼ一致し、最大応答（平均応答+動的応答）は設計値よりも小さめの傾向となることが明らかとなった。この結果は、ガスト応答を見込んだ風荷重の補正係数が、安全側の設定となっている可能性を示唆するものである³⁾。また、風速変動が大きい場合に、設計値を超える応答が生じる場合があったが、短時間の風速変動による応答が影響していることが明らかとなり、設計上は問題ないことを確認した⁴⁾。

2.2 地震時の多々羅大橋・来島海峡大橋での検討

2001年3月24日に発生した芸予地震時の多々羅大橋と来島海峡大橋に対する検討を行った。

多々羅大橋においては、上下部構造の動態観測記録を、観測地震動を用いた地震応答解析によりシミュレーションできるかの検討を行った。

多々羅大橋下部構造の検討では、支持地盤の剛性を、地盤内の割れ目や部分的な弱層の影響を考慮して低減すると共に、地盤の非線形性（地盤剛性のひずみ依存性や基礎の浮き上がり）を考慮した解析を行った。この結果、塔基礎の加速度応答の観測記録を概ねシミュレートすることができた⁵⁾。

多々羅大橋上部構造の検討では、端支点的橋軸方向の支承条件を可動から固定に変更すると共に、ケーブルに節点を設けケーブル重量を接点に振り分けることで、ケーブル振動を考慮できる解析モデルで検討を行った。端

支点の支承条件のモデル化の変更は、地震後の点検で支承の移動形跡が確認されなかったことから、摩擦係数の影響で滑り面の摩擦が切れなかったものと推測して行ったものである。解析の結果、主桁の橋軸方向の応答を精度よくシミュレートすることができた⁶⁾。

来島海峡大橋の検討では、観測地震動を用いた地震応答解析により、3吊橋のセンタースティの発生張力を検討した。来島海峡大橋のセンタースティには、設計地震動の60%の地震動でセンタースティを破断させるためのロッドが設けられている。芸予地震においては、3吊橋のうち、第一大橋のみでセンタースティロッドが破断し、第二大橋と第三大橋のセンタースティロッドは破断しなかった。解析でも、センタースティロッドの破断した第一大橋のセンタースティ張力のみが、ロッドの破断強度を超過する結果となった。来島海峡大橋では、橋体観測を行っていなかったため、解析値と地震時補剛桁の橋軸方向最大変位（補剛桁内に設置された維持管理用給水管の移動痕から推定した）の比較を行った結果、シミュレーション解析の妥当性が確認できた⁷⁾。

3. 今後の観測体制

3.1 観測目的の見直し

設計検証に関わる検討の結果、観測された外力は設計想定で半分程度の大きさであるが、建設時の設計法は安全側の結果が得られる方法であることが確認できた。

このため、今後の観測の目的は、作用外力がさらに大きくなった場合の自然風、地震動特性及び橋体挙動の観測と観測結果に基づく橋体の安全性評価とし、代表橋梁を選定して観測を継続することとする。

3.2 観測機器の更新計画

大鳴門橋を除く観測機器は、新設又は更新より、概ね10年が経過し、観測を継続するには、機器の更新が必要な時期となった。このため、以下に示す観測機器配置計画に基づいて、観測体制の整備を行うこととする。表-1に、観測機器の更新計画を示す。

- ・自然風特性の観測は、明石海峡大橋と多々羅大橋で継続する。
- ・地震動観測は、各ルート2ヶ所で継続する。
- ・代表橋梁において、橋体観測を継続する。
- ・上部構造の代表は、支間長1,000m以上の吊橋（明石海峡大橋、南備讃瀬戸大橋及び来島海峡大橋）、南海地震の震源に近い橋梁（大鳴門橋）及び最長の斜張橋（多々羅大橋）とする。
- ・下部構造の代表は、剛体基礎（明石海峡大橋2Pと多々羅大橋2P）と多柱基礎（大鳴門橋3P）とする。

3.3 観測記録の活用方法

大規模外力が観測された場合は、観測された大規模外力を入力として、社内の汎用プログラムによる構造解析システムで長大橋の構造解析を行い、橋体の安全性評価に活用する。

橋体観測を行う長大橋では、上記の解析結果と橋体応答値の比較を行い、橋体の挙動が設計想定どおりもしくは安全側の挙動をしていることを確認する。

表-1 動態観測設備の更新計画

Table 1 Updating plan of bridge monitoring system

ルート	観測内容	
A ルート	風観測	明石海峡大橋補剛桁上 5 箇所
	地震観測	明石海峡大橋 4A と大鳴門橋 5A 近傍
	橋体観測	明石海峡大橋 2P 基礎、2P 塔頂及び補剛桁 大鳴門橋 3P 基礎、3P 塔頂及び補剛桁
D ルート	地震観測	下津井瀬戸大橋 4A と北備讃瀬戸大橋 3P 近傍
	橋体観測	南備讃瀬戸大橋 6P 塔頂及び補剛桁
E ルート	風観測	多々羅大橋主桁上
	地震観測	多々羅大橋 1A と来島海峡大橋 7A 近傍
	橋体観測	多々羅大橋 2P 基礎、2P 塔頂、ケーブル及び主桁 来島海峡大橋 6P 塔頂及び補剛桁

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：明石海峡大橋耐風設計要領・同解説、1990.2
- 2) 楠原栄樹，山田郁夫，横井芳輝：明石海峡大橋動態観測設備で観測された台風時強風記録の分析、第20回風工学シンポジウム、pp.31-36, 2008.12
- 3) 楠原栄樹：明石海峡大橋の動態観測データを用いた振動特性同定手法の検討、本四技報、Vol.31, No.108, pp.22-27, 2007.3
- 4) 遠山直樹，山田郁夫，楠原栄樹：長大橋動態観測データの分析、第19回風工学シンポジウム、pp.495-500, 2006.12
- 5) K. Endo, M. Kitagawa, K. Kawaguchi, S. Fukunaga : Seismic behavior and simulation analysis using observed earthquake waves of the Tatara Bridge, Structural Engineerings World Congress, 2002.10
- 6) 河藤千尋，河口浩二，古村学：多々羅大橋の地震時挙動解析による設計検証、第59回年次学術講演会講演集、2004.9
- 7) 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ィロッド破断に対する検証、鋼構造論文集、Vol.10, No.39, pp131-141, 2003.9

明石海峡大橋主塔の制振対策再評価

Re-evaluation for Vibration Control of the Main Towers of the Akashi Kaikyo Bridge

長大橋技術センター 耐風・耐震グループリーダー

福永 勸

Susumu Fukunaga

長大橋技術センター 耐風・耐震グループサブリーダー

竹口 昌弘

Masahiro Takeguchi

1. 研究目的及び経緯

明石海峡大橋の主塔は、塔高が大きく可とう性があるため、一般に耐風性が不安定となる主塔架設時だけでなく吊橋完成時においても風による有害な振動（渦励振）の発生が想定され（表-1）、完成系に対してもダンパーによる制振対策がとられている。その制振対策では、本橋の社会的重要性等を踏まえて確実に制振するために、塔内のTMD（Tuned Mass Damper/質量同調式ダンパー：20基/塔）に加えて、下部水平材と側径間側の補剛桁との間に桁間ダンパー（オイルダンパー：4基/塔）を設置し、それぞれ単独でも制振可能となるよう二重の安全対策がとられている¹⁾（図-1）。これらの制振装置は、所要の性能を維持するために定期的な分解整備が必要であり、その頻度によっては維持管理コストが膨大になることが見込まれる。

本研究は、明石海峡大橋主塔の制振装置について、その維持管理コスト削減を目的として、①主塔の耐荷力と制振振幅の再評価、②制振効果の再評価（オイルの劣化等に伴うダンパーの減衰係数の変動が獲得減衰に及ぼす影響）、③主塔の減衰特性の把握に着目して検討を実施している。このうち、①、②については、平成22年度に検討を実施し、曲げ渦励振に対する制振振幅を緩和できること、ダンパーの減衰係数の管理基準値を大幅に緩和しても所要の制振効果が得られること、それにより制振装置を分解整備するサイクルは30年程度以上に延長できる可能性があり大幅な維持管理コストの削減が期待できることが確認された²⁾。平成23年度は、実橋の動態観測データを分析することにより③の検討を実施し、制振装置の設計及び本検討で前提としている主塔の構造減衰や制振装置の付加減衰効果の妥当性を検証した。

2. 研究内容

2.1 主塔単独の減衰特性の推定

吊橋完成系の主塔に対して、強制加振により所要の振幅を与え減衰特性を把握することは非常に困難である。そのため、主塔の減衰特性は、常時微動の動態観測データをRD法（Random Decrement Method）を用いて推定した。RD法は、ランダムな時系列波形の極大値を初期値とした小サンプルを数多く作成し、それらを多数重ね合わせ

表-1 主塔の渦励振特性（完成系）

Table 1 Characteristics of Vortex-induced Oscillation of the Main Towers (Completion of Bridge)

項目	振動モード		備考
	曲げ1次	ねじれ1次	
振動数 (Hz)	0.442	0.747	
振動振幅 (cm)	95	217	スクルトン数と振幅の関係から算出 ($\delta=0.02$)
共振風速 (m/s)	36	66.7	設計風速：66.7m/s

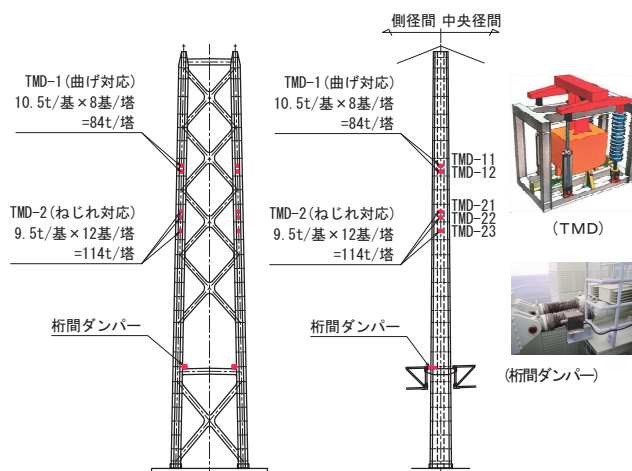


図-1 明石海峡大橋主塔の制振対策概要

Fig.1 Location of Vibration Control Devices of the Main Towers

ることにより、時系列波形のランダム成分の和がゼロに近づき、自由減衰振動を得るものである。ここでは、主塔単独の曲げ1次振動における構造減衰を推定することを目的に、制振装置が作動していない状態の常時微動データ（塔柱の65%高度位置における速度計データ）をRD法により分析した。

図-2にRD法により得られた主塔の曲げ1次振動に対する自由減衰波形例、図-3にRD波形から求めた主塔単独の構造減衰の推定結果を示す。1ケース当たりの対数減衰率（指数近似）は、 $\delta=0.1\sim 0.2$ 程度の範囲にあり、主塔の構造減衰の設計値（ $\delta=0.02$ ）に対して十分に大きい。また、RD波形の1波当たりの構造減衰も、ばらつきは大きいものの設計値（ $\delta=0.02$ ）以上である。

以上の分析結果から、主塔単独の構造減衰は、設計値（ $\delta=0.02$ ）を確保しているものと評価した。

2.2 主塔（制振装置を含む）の減衰特性の推定

明石海峡大橋主塔において、供用後に渦励振が観測され制振装置が作動したのは、台風9807号襲来時（1998年9月22日）のみである。この時の動態観測データ（表-2）を用いて、制振装置の付加減衰を含めた主塔の減衰特性を推定した。なお、渦励振発生時の主塔の振動波形には、空力励振力の影響が含まれるため、RD法により

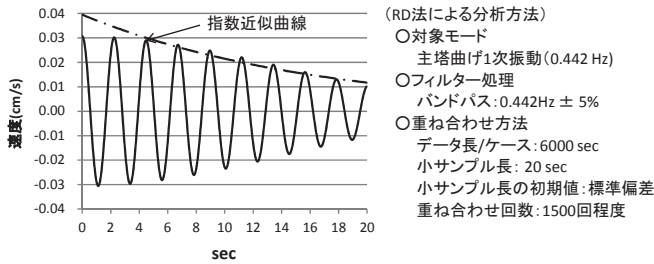


図-2 RD法による主塔の自由減衰波形の例

Fig.2 Free Decay Waveform of the Main Towers by RD Method

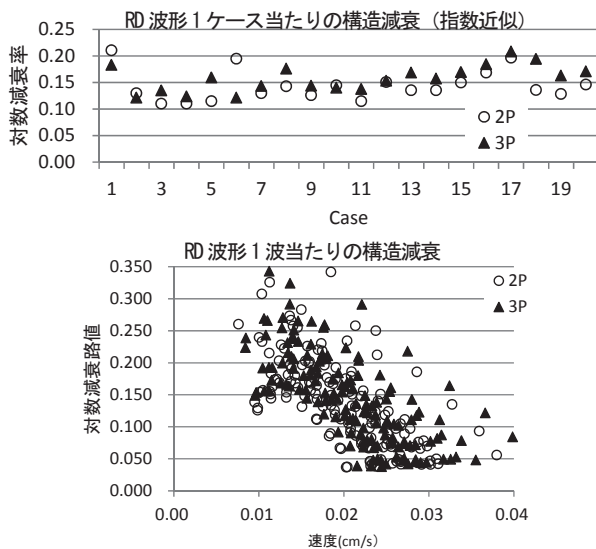


図-3 RD法による主塔の構造減衰の推定結果

Fig.3 Estimation Results of Structural Damping of the Main Towers by RD Method

構造減衰を推定することは困難である。そのため、渦励振発生時の主塔（制振装置を含む）の構造減衰は、動態観測結果と建設時に実施された風洞試験結果とを比較することで推定した（図-4）。ここで、風洞試験結果は、動態観測データの気流特性（乱れ強さ $lu=6\sim 12\%$ 程度）を考慮して、乱流試験（ $lu=5\%, 10\%$ ）の結果を用いることとした。

実橋で観測された主塔の渦励振振幅は最大で30 mm程度であり、主塔（制振装置を含む）の構造減衰は設計で期待している $\delta=0.278$ と仮定すると、振幅と減衰の関係は風洞試験結果の下限線付近にあたる。すなわち、風による励振力は風洞試験と同等であることが条件となるが、実橋における主塔（制振装置を含む）の構造減衰は、風洞試験による振幅と減衰の関係を用いて推定すると、設計で期待している値以上が確保されていると評価できる。

平成24年度は、これまでの研究成果をとりまとめ、制振装置の維持管理マニュアルに反映させる予定である。

参考文献

- 1) 秦, 辰巳, 大倉, 大西: 明石海峡大橋主塔の制振対策, 土木学会論文集 No.507/I-30, pp.279-289, 1995.1
- 2) 福永, 角, 竹口: 明石海峡大橋主塔の制振対策再評価, 本四技報, Vol.36, No.117, pp.34-35, 2011.9

表-2 主塔の動態観測結果（渦励振発生時）

Table 2 Observational Results of Vortex-Induced Oscillation at the Main Towers

計測時刻	風特性（中央径間中央位置）				最大振幅(m)	
	風速		乱れ強さ (%)	水平偏角 (°)	(BPF: 0.4~0.5Hz)	
	平均 (m/s)	最大 (m/s)			2P	3P
14:03~	26.4	36.8	12.0	6.3	0.027	0.029
14:13~	32.3	39.3	7.1	-9.4		
14:23~	33.2	39.3	6.1	-20.6		

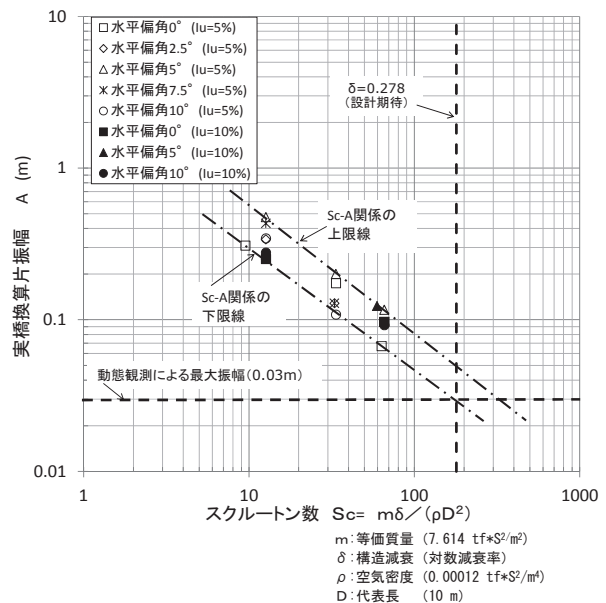


図-4 動態観測結果と風洞試験結果との関係

Fig.4 Comparison of Observational Results and Wind Tunnel Test Results

赤外線サーモグラフィ法による疲労亀裂の検出

A study on fatigue crack detection for bridges using infrared thermography

長大橋技術センター 診断・構造グループリーダー	小林 義弘 Yoshihiro Kobayashi
長大橋技術センター 診断・構造グループサブリーダー	川端 淳 Sunao Kawabata
長大橋技術センター 診断・構造グループ	溝上 善昭 Yoshiaki Mizokami

1. 研究目的及び経緯

鋼橋の疲労損傷については、亀裂はまだ小さい早期の段階で見つけることが重要である。現状の点検は、主に近接しての目視点検により溶接継手部の塗膜割れやさび汁の発生等から疲労損傷を捕捉し、必要に応じて磁粉探傷、超音波探傷により亀裂長さなどの調査を行っている。しかしながら、疲労に対する点検対象部位は多く、管理路や点検用作業車から全ての部位に必ずしも近接可能ではない。このようなことから、遠隔から簡易に精度よく鋼橋の疲労亀裂を検出できる手法の開発が望まれる。

近年、赤外線サーモグラフィ装置により、変動応力の作用に伴い材料表面に発生する温度変動(熱弾性温度変動。圧縮応力では温度上昇、引張応力では温度降下が生じる。)を計測し、その結果から疲労亀裂の検出、亀裂近傍の応力変動を評価する方法が開発されている。この方法は、非接触による計測であるため、調査部位を見通せれば遠隔からでも亀裂検出、評価が行える可能性を有している。

本研究は、神戸大学との産学連携の共同型協力研究として、赤外線サーモグラフィ装置による熱弾性温度変動計測から鋼橋の疲労亀裂の検出及び疲労損傷評価法の開発を目標にH23年度に開始した。研究初年となるH23年度は、鋼橋に発生した疲労亀裂を対象に、赤外線サーモグラフィ装置で亀裂周辺の実交通により発生する熱弾性温度変動を計測し、これをもとにした疲労亀裂の検出及び変動応力の把握の可能性について検証を行った。

2. 研究内容

2.1 熱弾性温度変動の計測

計測対象は、疲労亀裂の発生が報告されている岩黒島

橋の格点24の上り線側の鋼床版G2及びG3縦桁の横桁交差部の垂直補剛材とし(図-1)、計測には、MCTアレイセンサを搭載した波長帯域7.5~9.1 μ m、温度分解能25mKの赤外線サーモグラフィ装置(写真-1)を用いた。

赤外線サーモグラフィ装置による計測では、塗膜が計測の阻害要因となるため、計測部については塗膜を除去し、表面の反射を防ぎ赤外線の放射率を向上させるつや消し黒色塗料を塗布する。しかしながら、実橋における疲労亀裂の検出では、塗膜のある状態で行われると想定されることから、塗膜の亀裂検出性に対する影響を把握できるように、既存塗膜のままの状態、既存塗膜上から黒色塗料を塗布した状態及び既存塗膜を除去し黒色塗料を塗布した状態の3条件を考慮した。

各計測部及び各条件での計測は、自動車や列車の通過に合わせ、亀裂周辺の時系列赤外線強度分布をフレームレート157fpsで30秒間撮影(計測)し、着目部位と周辺の時系列赤外線強度を照合して信号ノイズ比を改善する自己相関ロックイン処理を行った。

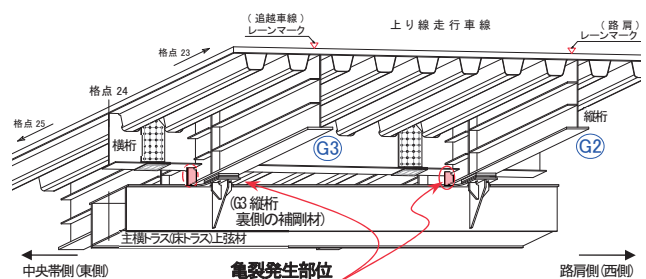


図-1 計測の対象とした鋼床版縦桁の横桁交差部の垂直補剛材

Fig.1 Vertical stiffeners measured by infrared thermography

2.2 塗膜が疲労亀裂検出性に与える影響

図-2に示す3つの画像は、質量22.3tの荷重車が80km/hで上り線走行車線を走行した時のG2縦桁の東側垂直補剛材の亀裂部の赤外線強度分布を亀裂先端近傍を参照信号取得点として自己相関ロックイン処理を行った画像

(参照信号取得点に対する相対赤外線強度の分布)で、塗膜の条件のみが異なる。しかしながら、いずれの条件でも垂直補剛材の少し内側で顕著な温度変化が表れており、亀裂先端部での応力集中をよく捉えている。

なお、この計測で対象とした亀裂は、過去に塗膜を除去しての調査で確認されたものである。そのため、計測時の塗膜は、簡易防食塗装のものではあるが、塗膜がある状態でも疲労亀裂の検出は行える可能性が高いことがわかった。これを踏まえて、今後は、疲労亀裂検出性に対する重防食塗装塗膜の影響の検証を行う予定である。

2.3 亀裂先端部の変動応力の把握

図-3は、既存塗膜を除去し黒色塗料を塗布して計測した結果を示しており、図中a)は質量22.3tの荷重車の上り線走行車線走行時の、同b)は5両編成の下り旅客列車通過時の、G2縦桁の東側垂直補剛材及びG3縦桁の西側垂直補剛材で計測された熱弾性温度変動である。図中に示している画像は亀裂先端近傍を参照信号取得点として行った自己相関ロックイン処理画像で、その下に示すのが亀裂先端部の赤外線強度変動波形である。

鋼材に断熱条件とみなせる繰り返し速度で荷重を載荷すると、圧縮応力下では断熱温度上昇、引張応力下では断熱温度降下が生じる。これを踏まえ、亀裂先端部の赤外線強度変動波形をもとに発生応力変動を考えると、荷重車が走行車線を走行した場合は、G2縦桁の東側補剛

材、G3縦桁の西側補剛材ともに圧縮応力変動が生じ、下り列車の通過時には、G2桁東側補剛材は圧縮であるのに対し、G3桁西側補剛材は引張応力変動が生じることがわかる。これは、H22年に今回の計測位置と対称となる下り線側のG2縦桁とG3縦桁の垂直補剛材で実施したひずみゲージによる実交通の応力変動計測結果と一致しており、また、赤外線強度変動波形もひずみゲージ計測から得られている応力波形にも高い類似性が見られた。

赤外線サーモグラフィ装置による熱弾性温度変動計測は、非接触で行え、計測時の機動性が高い。また、前述のように、ひずみゲージによる計測と同等の応力変動計測できる可能性がある。このようなことから、本計測法は、鋼橋の実荷重下における疲労亀裂部の発生変動応力の計測法としても適用が期待できる。

3. まとめ

赤外線サーモグラフィ装置による熱弾性温度変動計測が、鋼橋の疲労亀裂の検出、亀裂近傍部の変動応力計測に対して、高い適用可能性を有していることを確認した。今後は、鋼橋の疲労損傷の早期検出をめざした亀裂のスクリーニング法、変動応力計測の実用化、また、本計測法の計測結果から疲労損傷評価を行う手法の構築をめざした研究に取り組みたいと考えている。



写真-1 赤外線サーモグラフィ装置

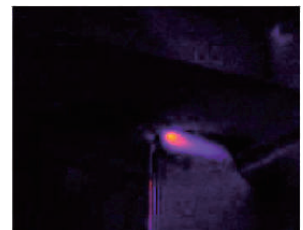
Photo 1 Infrared thermography device



A) 既存塗膜(簡易防食塗装)のまま



B) 塗膜上から黒色塗料塗布



C) 塗膜除去し黒色塗料塗布

図-2 塗膜条件を変えて計測した赤外線強度分布の自己相関ロックイン処理画像

Fig. 2 Pictures of thermoelastic temperature measurement, Comparison with coating conditions

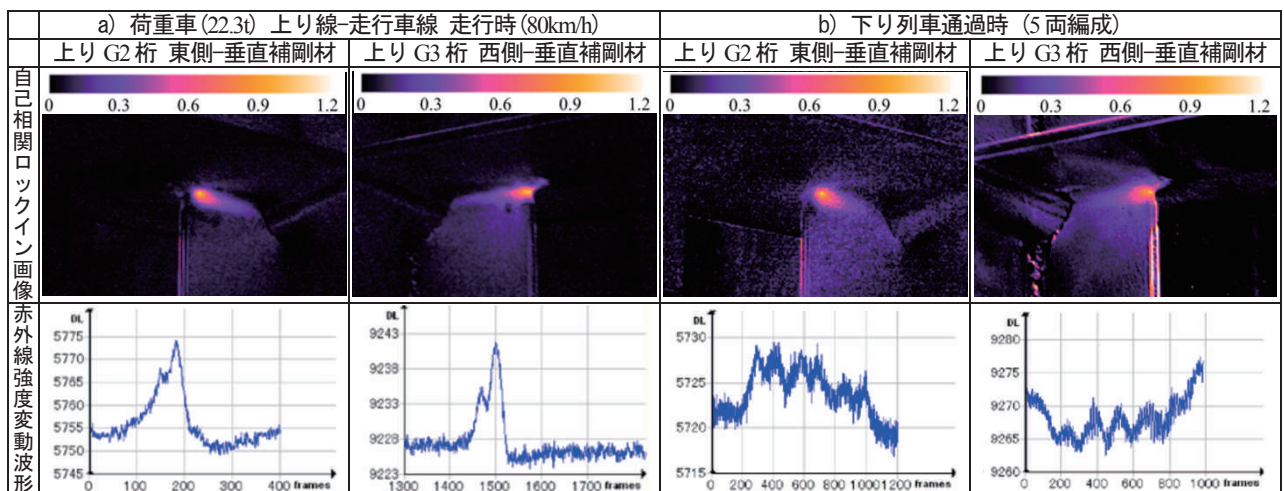


図-3 赤外線サーモグラフィ装置による熱弾性温度変動の計測結果(荷重: 荷重車, 5両編成の下り列車)

Fig. 3 Results of thermoelastic temperature measurement by weight loading vehicle and 5-car train (down-direction)

工業用内視鏡の狭隘部の点検への適用性検討

A study on inspection of narrow sections in bridges using industrial video-scope

長大橋技術センター 診断・構造グループリーダー	小林 義弘 Yoshihiro Kobayashi
長大橋技術センター 診断・構造グループサブリーダー	川端 淳 Sunao Kawabata
長大橋技術センター 診断・構造グループ	溝上 善昭 Yoshiaki Mizokami

1. 研究目的及び経緯

本州四国連絡橋の海峡部橋梁の点検は、主に近接目視、触診及び打音により行われている。しかしながら、橋梁には、近接困難な部位や、直接目視することが難しい狭隘部や閉空間もあり、従来から行われている点検を補完し、このような部位の状態をより正確に把握できる調査方法が必要となっている。

従来から、工業プラントの配管設備、航空機のエンジンなどの検査に工業用内視鏡が使用されており、橋梁での調査にもファイバースコープ等が使用された事例もある。近年の光学技術や画像処理技術の発展は著しく、工業用内視鏡についても挿入部が小径化され挿入性を高めた工業用ビデオスコープが開発されている。橋梁の狭隘部や閉空間に関しては、開口部はボルト孔やスカラップなどに限られ、挿入性の高い工業用ビデオスコープは、このような部位の調査にも有効性があると考えられる。

これらのことを踏まえ、実橋の狭隘部や閉空間において、挿入部の外径が6.0mmの工業用ビデオスコープを試用して内部状況の調査を行い、その適用性を検証した。

2. 研究内容

2.1 工業用ビデオスコープ

工業用ビデオスコープは、挿入するスコープ先端部が受像素子(CCD素子)とLED光源を配置したカメラとなっており、それで撮影した映像をコントロールユニットにケーブルで伝送して、液晶画面へ写し出すとともに、必要に応じて映像記録が行える。また、スコープ先端部は、ジョイスティック操作による首振りができ、カメラの方向を変えながら広い範囲を観察することができる。

スコープ外径については、より小さいほうが挿入でき

る部位は多くなる。しかしながら、小径のスコープでは、先端部に配置するLED光源をスペース的制約から小さなものにする必要があり、取得できる映像の品質は低くなる。また、スコープ部の調査部への挿入は、挿入口でケーブルを押し込むように行うため、小径でケーブル部の剛性が小さいスコープでは、挿入時の作業性も低下する。

調査時においては、スコープ部のねじれやたわみにより、意図せずカメラの向きが変わり、何をどのように視認しているのかわからなくなることがある。このため、スコープ挿入開始からの映像を連続的に記録できる動画撮影機能を有する工業用ビデオスコープが有利である。

今回の調査には、このようなことを踏まえ、表-1及び写真-1に示すスコープ外径6.0mmの静止画と動画の記録機能を持つ工業用ビデオスコープを適用し、必要に応じてスコープの挿入方向確保やケーブル部を支持する写真-2に示すガイドチューブを用いた。

2.2 調査部位とその状況

調査は、表-2に示すように、斜張橋の桁側ケーブル定着部、吊橋主ケーブルのカラー部、鋼床版Uリブ内部、管理路手摺りの内部など、直接目視が困難な部位に対して行った。表-3には、工業用ビデオスコープで撮影した調査部位の状況写真の一部を例として示している。

この調査により、門崎高架橋4径間部のUリブの一部や伯方大橋大橋の主塔部鉛直支承のローラー部などでの発せい、因島大橋の補剛トラス管理路の手摺り内部での腐食の発生を確認したが、調査した各橋の主要構造部位に関しては、軽微な汚れなどが認められる程度で、問題となる変状は生じていないという結果を得た。

2.3 適用性に関する検証

実橋における試用から、工業用ビデオスコープは狭隘部などの調査に対して有効であることが分かった。その一方で、効率的で正確な調査のために留意すべき事項も

明らかとなった。

工業用ビデオスコープでの調査では、調査時の狭隘部の状態は撮影映像という限定的情報から把握するしかない。そのため、事前に図面などから調査対象部位の構造をよく把握し、スコープの挿入位置と内部での進入経路を検討しておくことが不可欠で、更に、調査中の調査対象の見え方をイメージしておく必要がある。また、調査時においては、スコープ先端部の位置を適切に把握することが重要である。これについては、あらかじめスコープ部に長さの目盛を付し、これでスコープの挿入長を確認しながら調査するのが有効で、更に、これを撮影

画像と整合するように記録することで、調査結果の整理においても有用な情報ともなる。

3. まとめ

これまでの検討から、工業用ビデオスコープは、橋梁の狭隘部の調査においても有効なデバイスであることを確認した。今後は、本検討を踏まえて、適用箇所拡大及び工業用ビデオスコープの長大橋点検における具体的な適用方法(機器仕様、適用箇所、頻度等)の検討を行うための追加データ収集を行う予定である。

表-1 工業用ビデオスコープの仕様
Table 1 Specifications of industrial video-scope

挿入部の外径	6.0mm	
挿入部の長さ	3,500mm	
先端部の首振り角度	130°(4方向)	
静止画記録	解像度	640×480 Pixel
	記録方式	JPEG
動画記録	解像度	640×480 Pixel
	記録方式	AVI MPEG4



写真-1 工業用ビデオスコープ
Photo 1 Industrial video-scope



写真-2 ガイドチューブ
Photo 2 Guide tube

表-2 工業用ビデオスコープによる調査箇所

Table 2 Examined narrow sections in bridges with industrial video-scope

橋梁名	部位・部材	橋梁名	部位・部材
大鳴門橋	主塔部の主ケーブルカラー内	因島大橋	補剛トラス 管理路手摺りの内部
	側塔サドル室内	生口橋	桁側ケーブル定着部
	主塔部ウィンドタング内部		塔部支承(BP-b)のシールゴム内部
門崎高架橋	鋼床版Uリブ内	生口橋東高架橋	RC ホロースラブの円筒型枠内部
下津井瀬戸大橋	トンネルアンカー最下段仕切りガーダー		床版コンクリート剥落部
櫃石島橋	桁側ケーブル定着部	多々羅大橋	桁側ケーブル定着部
南備讃瀬戸大橋	補剛トラス 主横トラス 下弦材内部		伸縮装置(ローリングリーフ)支持台内部
	補剛トラス 管理路手摺りの内部		塔基部アンカーボルトの塔側定着部内部
因島大橋	補剛トラス 主横トラス 上弦材内部	伯方大島大橋	主塔部鉛直支承のローラー部

表-3 工業用ビデオスコープにより取得した狭隘部の状況(例)

Table 3 Condition of narrow sections in bridges taken by industrial video-scope (Examples)

<p>2011/03/29 10:43 OLYMPUS a) 大鳴門橋 4P 主塔部ケーブル カラー一部内(下り線中央径間側)</p>	<p>2011/03/30 14:34 OLYMPUS b) 大鳴門橋 2P 側塔サドル部 (下り線側 ケーブル素線状況)</p>	<p>2011/03/29 13:19 OLYMPUS c) 門崎高架橋 4径間部 Uリブ内部 (下り線側張出し部 5P 近傍)</p>
<p>2011/03/07 11:40 OLYMPUS d) 生口橋 2P 下り線側支承 シールゴム内部</p>	<p>2011/03/02 11:53 OLYMPUS e) 多々羅大橋 側桁側ケーブル定着部 (S7 下り線側)</p>	<p>2011/03/02 09:53 OLYMPUS f) 因島大橋 補剛桁管理路 手摺り内部(腐食部)</p>

■PIARC 道路橋技術委員会報告

2012年3月27日～29日の3日間、世界道路協会（World Road AssociationまたはPIARC）のテーマ4（社会基盤）のキックオフミーティングがパリのPIARC本部で開催された。キックオフミーティングは次の4つのテーマごとに開催されており、テーマ1～3のキックオフミーティングは既に完了している。

テーマ1：マネジメントとパフォーマンス

テーマ2：アクセスと移動

テーマ3：安全性

テーマ4：社会基盤

世界道路会議は4年毎に開催されており、前回の第24回会議は2011年9月にメキシコ・シティで開催された。次回の第25回は2015年9月に韓国、ソウルで開催されることが決まっている。世界道路協会では、上記の4つのストラテジック・テーマのもと17の技術委員会を設けて今回のキックオフミーティングから活動を開始する。

テーマ4（社会基盤）の下には、以下の4つの技術委員会があり、その中の1つがTC4.3道路橋である。

TC4.1: アセットマネジメント

TC4.2: 道路舗装

TC4.3: 道路橋

TC4.4: 土工と未舗装道路

各技術委員会は、2012年～2015年の4年間の活動の中で与えられた課題についての研究成果をまとめ、2015年の世界道路会議のテクニカルセッションでその成果を発表することとなっている。今回のキックオフミーティングは、その4年間の活動の1回目という位置づけである。日本からはTC4.3道路橋の委員長を財団法人海洋架橋・橋梁調査会の加島常務が務められ、国土交通省国土技術政策研究所道路構造物管理研究室の玉越室長、一般社団法人日本橋梁建設協会の佐藤氏と筆者が委員として加わっている。このTC 4.3には、「社会基盤」のテーマのもとで4年間の活動にあたって、以下の4つの課題と活動方針が与えられている。

課題1：気候変動への適応

IPCC 第二作業部会の評価を考慮し、気候変動への適応が条件となる道路橋の技術的側面を特定

課題2：新しい補修及び修復材料

費用対効果を考慮して開発・導入・研究された新しい補修及び修復材料のレビュー

新しい補修及び修復材料の評価手法をレビュー

新しい補修及び修復材料の導入に関して道路関係機関が採用したアプローチを調査

課題3：橋梁ストックのリスクベース・マネジメント

橋梁ストックのマネジメントにおいて用いられているリスク評価をレビュー

既存ツールを調査し、評価レビューを作成

課題4：損傷や欠陥に基づく橋梁の耐荷重能力の推定

損傷や欠陥に基づく橋梁の耐荷重能力の既存推定手法を分析

損傷や欠陥を低減する耐荷重能力推定のデータ利用に関するベストプラクティス・アプローチを特定

3日間の会議は、1日目に全体会議が実施され、2日目以降は各技術委員会に分かれて会議が進められた。TC4.3 道路橋の技術委員会（写真）は加島委員長と3名のセクレタリー（仏語、英語、西語）を含め29名の委員が参加して行われた。委員会では、委員紹介、前期（2008-2012）の成果報告、TC4.3の4つの課題の説明の後、課題について理解を深める議論が活発になされた。その上で4つのテーマに対し以下の3つのグループで活動することを決めた。その後、各グループに分かれ今後の活動内容、活動計画について話し合われた。各グループが担当する課題とそのリーダー、サブリーダーは以下のとおりである。

グループ1：リーダー: Kevin REID (New Zealand)

サブリーダー: Borre STENSVOLD (Norway)

課題1. 気候変動への適応

課題3. 橋梁ストックのリスクベース・マネジメント

グループ2：リーダー: Pierre GILLES (Belgium)

サブリーダー: Michele MELE (Italy)

課題2. 新しい補修及び修復材料

グループ3：リーダー: Kiyohiro IMAI (Japan)

サブリーダー: Scot BECKER (USA)

課題4. 損傷や欠陥に基づく橋梁の耐荷重能力の推定

次回の第25回の世界道路会議は韓国で開催されることが決められている。今期（2012-2015）の道路橋にかかわる課題4つのうち課題4の「損傷、劣化を反映した橋梁の耐荷力評価」は、日本から提案したものであり、4年後に有益な成果が得られることを期待している。

（保全部 道路保全課長 今井清裕）



写真：TC4.3 道路橋技術委員会

■北米西海岸橋梁調査

2012年5月27日に開催されたゴールデンゲート橋75周年記念セレモニーに合わせて、北米西海岸の吊橋等の橋梁調査を実施した。調査団は本四高速グループから、佃前執行役員経営計画室長、竹内前保全部道路保全課長代理、坂出管理センター道路維持課光畑、及び、ブリッジ・エンジニアリング伊藤の4名で構成され、5月28日から6月1日の5日間にわたって、ゴールデンゲートブリッジ、サンフランシスコ・オークランド・ベイブリッジ、タコマナロウズブリッジなどの調査を実施した。

(1) ゴールデンゲートブリッジ

ゴールデンゲートブリッジはサンフランシスコ湾上の橋梁で、1937年に供用を開始し今年で75周年を迎えた。中央径間長は1,280mであり、供用当時は世界最大の吊橋であった(2012年8月時点では世界第12位)。調査団は、このゴールデンゲートブリッジを管理するGolden Gate Bridge, Highway and Transportation District (DISTRICT)を訪問し、近年の維持補修等に関する技術交換を実施した。ゴールデンゲートブリッジは日平均交通量約11万台(上下線合計、2010-2011年)であり、料金徴収は一方向のみ(南向き)となっている(写真-1)。料金は一般的な車両である2軸車両の場合、現金支払いの場合6USD、FasTrakと呼ばれるETCタイプの場合で5USDであり、年間総収入は約1億USDとなっている。ゴールデンゲートブリッジにおける現在の主な保全作業としては、北側取付高架橋の塗替塗装を実施中である。なお、DISTRICTは橋梁のみならず、運行バス及び橋梁下のフェリーの運営も行っており、これらすべてを含めての収支方式となっている。



写真-1 ゴールデンゲートブリッジ

(2) サンフランシスコオークランドベイブリッジ

サンフランシスコ市とオークランド市を結ぶサンフランシスコ・オークランド・ベイ・ブリッジは1936年に供用を開始した。サンフランシスコから途中の島トレジャーアイランドまでの間(West Span)が2連の吊橋、トレジャーアイランドからオークランド側(East Span)がトラス桁等からなる高架橋構造となっている。同橋は耐震

補強工事を実施しているが、East Spanにおいては、設計照査の結果抜本的な耐震補強が必要と判断され、新橋への架替えとなった。新橋は、自碇式吊橋形式が選定され、現在は主塔及び主ケーブルの架設をほぼ終え、2013年9月の供用が予定されている(写真-2)。また、新橋架設後は現橋は撤去される計画である。



写真-2 建設中の自碇式吊橋

(3) タコマナロウズブリッジ(新旧)

1940年7月に供用を開始したタコマナロウズブリッジは、そのわずか4ヶ月後に設計風速以下の風により落橋したことで世界的に有名であり、その後の耐風設計での大きな教訓とされている。その後の耐風設計の知見も取り入れられ、1950年に改めて同地点に架橋された。その後、交通量の増加に伴い2007年には新橋が隣接して架設され現在に至っている(写真-3)。調査団は、同橋を管理するWashington State Department of Transportation (WSDOT)の現地事務所を訪問し、維持管理の現況等について調査を行った。新橋完成後はそれぞれの橋梁が1方向通行となっており、交通量は約4万台/日(1方向のみ、2010-2011)、料金収入は約44百万USD(2010-2011)となっている。通行料金は、一般的な車両である2軸車両の場合、現金支払いの場合5USD、Good to Go!と呼ばれるETCタイプの場合で4USD(2012年7月より)となっている。WSDOTによれば、維持・修繕に関する2030年までの中期投資計画を策定している。同計画によれば、年ごとの投資額にはばらつきがあるものの、舗装補修やハンガーロープ補修塗装などの修繕に平均約2百万USD/年程度の投資を予定している。



写真-3 新・旧タコマナロウズブリッジ
(長大橋技術センター総括・防食グループ竹内政彦)

■第6回橋梁の維持管理と安全性に関する国際会議への参加とトルコ長大橋調査

第6回 IABMAS (International Association for Bridge Maintenance and Safety) : 橋梁の維持管理と安全性に関する国際会議が2012年7月9日から11日の3日間、イタリアのストレーザで開催された。会議は、老朽化した橋梁の増加に伴う世界的な課題に対応するため、維持管理における各国の効果的な対応事例に対する議論と情報共有を行うことを目的に、2002年より2年毎に開催されている。

今回の会議には、46カ国から746人が参加し、口頭発表論文数は555編であった。日本からの参加者は73人であり、イタリア(開催国)、アメリカに次いで3番目に多い参加であった。本四高速グループから、坂出管理センターの楠原、胸永、観光・お客様サービス室の高砂、ブリッジ・エンジニアリングの桑原の4名が参加し、楠原が「Maintenance optimization of suspender ropes of suspension bridges」と題し本州四国連絡橋における吊橋ハンガーロープ維持管理手法について発表した(写真-1)。

基調講演は、カリフォルニア大学の篠塚教授による橋梁モニタリングに関する研究を始めとする7編の講演が行われ、会場では多くの技術者が興味深く講演を聞いていた。テクニカルセッションは、8つの会場で、1日あたり3時間帯(午前、午後、夕方)に分けられた72セッションで実施された。センシングやモニタリングに関する多くの発表があったが、橋梁の維持管理への活用に至っていない状況であり、今後の開発が期待される内容のものがほとんどであると感じた。また、橋梁の維持管理と安全性確保に貢献した業績に対して授与されるIABMAS Awardを、東京大学の藤野陽三教授が受賞された。

次回以降は、第7回会議が2014年6月に中国の上海で、第8回会議が2016年6月にブラジルのフォス・ド・イグアスで開催される予定である。

IABMASに参加した後に、トルコのイスタンブールに立ち寄り、7月13日には第一ボスポラス橋(中央支間長1,074m、1973年完成)および第二ボスポラス橋(中央支間長1,090m、1988年完成)の管理事務所を訪問し、長大吊橋の維持管理に関する意見交換を行った。先方は、ケーブルの送気乾燥による防食システムに興味を示したため、日本の導入状況とその効果について説明を行った。

翌日の7月14日には、イズミット湾横断橋の架橋予定地点の調査を実施した。イズミット湾横断橋は、イスタンブールとイズミール(トルコ第3の大都市)を連絡する全長約370kmの高速道路のうち、イズミット湾を南北に繋ぐ、全長2,800m、中央支間長1,500~1,600mクラスの吊橋である。橋梁部分は、日本の企業(株)IHIインフラシステムと伊藤忠商事(株)が調査、設計、施工を受注し、現地の準備工事に着手したところである。

(坂出管理センター 橋梁維持第一課 楠原栄樹)

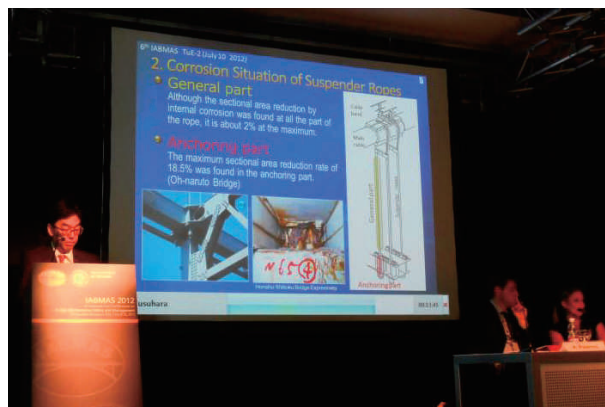


写真-1 本四高速からの発表(IABMAS)



写真-2 ボスポラス橋管理事務所での意見交換



写真-3 第二ボスポラス橋(塔頂より)



写真-4 イズミット湾横断橋架橋予定地点

文 献 紹 介

本州四国連絡橋関連技術文献紹介 (12.02~12.07)

題 名	著 者	雑誌名等	卷	号	年月	頁
本州四国連絡高速道路株式会社	本州四国連絡高速道路(株)	高速道路と自動車 第54巻第04号	54	4	201104	3
本州四国連絡高速道路株式会社	本州四国連絡高速道路(株)	高速道路と自動車 第54巻第08号	54	8	201108	3
Study on reduction of vibration control devices for Akashi-Kaikyo Bridger 明石海峡大橋の制振装置削減のための検討(英語)	藤原亨 荻原勝也 福永勸	第24回世界道路会議			201109	15
Results of field observation for vibration of cables on Tatara Bridge 多々羅大橋ケーブル振動に対する現地観測結果(英語)	福永勸	JaWEiK6 (The 6th Korea-Japan Joint Workshop on Wind Engineering)			201110	11
力の融和 明石海峡大橋	平野茂	Ace建設業界2012. 1			201201	6
鋼道路橋に関する技術基準の変遷 第10回道路橋示方書Ⅱ鋼橋編	遠山直樹	道路 2012. 01			201201	4
第24回世界道路会議 PIARC メキシコ大会 技術委員会セッション 地方道路システムとその使用性	西谷雅弘	道路 2012. 01			201201	1
連載のはじめに-長大橋ランキングと橋の基礎 連載講座 最近の海外の長大橋基礎 第1回	岡野哲	基礎工Vol. 40No. 02	40	2	201202	3
本四道路を使用した企業の生産活動の大きさについて	本州四国連絡高速道路(株) 企画部	道路 2012. 04			201204	5
本州四国連絡橋における橋面舗装の変状原因調査	中村哲也 石倉健治 下館鎮 小関裕二 稲葉行則	舗装2012. 07			201207	6

※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)平成24年8月31日現在

委員長	藤原亨	幹事長	荻原勝也
委員	有村真二	幹事	石原和幸
	今井清裕		糸日谷淑光
	荻原勝也		遠藤和男
	川上賢明		荻田隆行
	木村一也		川端淳敦
	小林義弘		後藤剛史
	酒井和吉		杉山政彦
	西谷雅弘		竹内昌弘
	福永勸潔		竹口淳史
	政田保仁		布下浩史
	真辺知司		平宮典博
	村田一彦		宮脇正生
	山田和彦		森野賢晃

本四技報 第119号

発行 平成24年9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)
<http://www.jb-honshi.co.jp>



