

本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.41 No.128 2017.3

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 128 号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.128

【巻頭言】

- 技術開発の推進……………萩原勝也… 1
Technology Development

【技術論文】

- 鋼床版 U リブとデッキ間のビード貫通亀裂に対する ……溝上善昭・森山 彰・貴志友基… 2
TRS を用いた下面補修法の開発
Development of repair method using Thread Rolling Screw for bead-penetrating crack
in orthotropic steel deck stiffened by closed section ribs
- 瀬戸大橋吊橋（下津井瀬戸大橋、南北備讃瀬戸大橋）の耐震性能照査、補強設計……………西谷雅弘・河藤千尋…10
Seismic retrofit design of Seto-Hashi suspension bridges
(Shimotsui-Seto, Kita Bisan-Seto, and Minami Bisan-Seto Bridges)
- 瀬戸大橋管理路の劣化度評価及び補修方法に関する検討……………安部真理子・門田整達・遠藤和男…18
A Study on Deterioration Grading and Repair Method of Maintenance Ways at Seto-Hashi Bridges
- 因島大橋・大島大橋ハンガーロープ塗替え塗装……………森脇正生・林 昌弘・藤澤幸廣…24
Suspender rope re-painting of Innoshima Bridge and Ohshima Bridge
小河正次
- 来島海峡大橋ハンガーロープ定着部調査……………林 昌弘・小河正次・高田大資…32
Investigation for the anchor zone of suspender rope of Kurushima-Kaikyo Bridge

【技術ニュース】

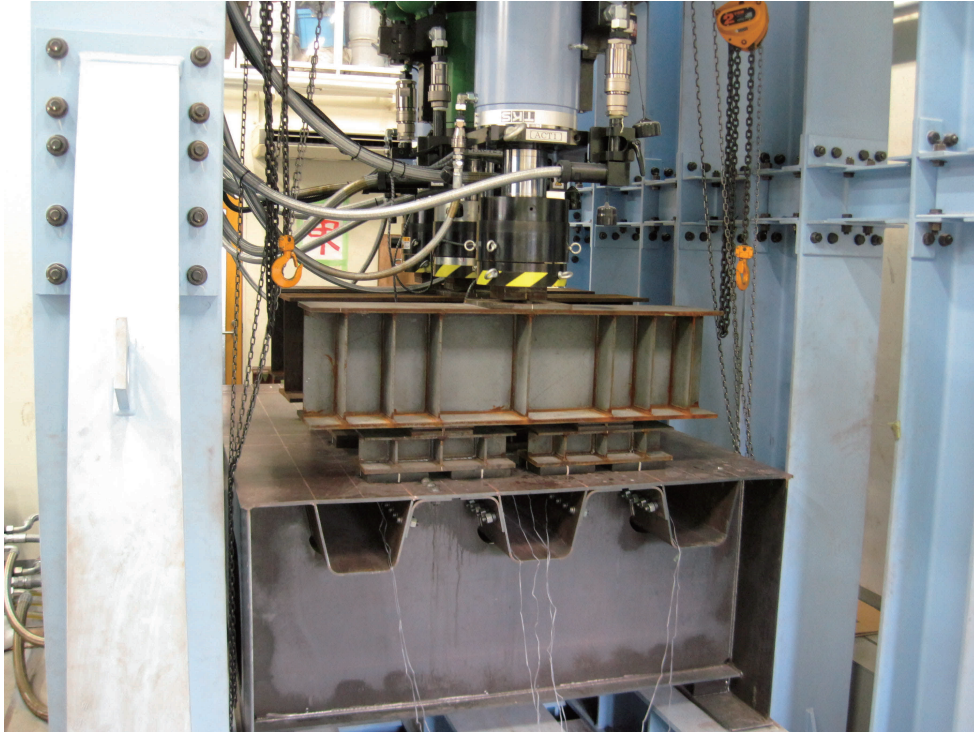
- 第 19 回 IABSE スtockホルム大会 ……西谷雅弘…39
19th Congress of IABSE, Stockholm
- 第 2 回国際道路連盟アジア地域会議……………竹口昌弘…40
The 2nd International Road Federation Asia Regional Congress & Exhibition

【文献紹介】

- 本州四国連絡橋関連技術文献紹介……………41
Technical articles related to Honshu-Shikoku Bridges
-

鋼床版Uリブとデッキ間のビード貫通亀裂に対する TRSを用いた下面補修法の開発

Development of repair method using Thread Rolling Screw for bead-penetrating crack
in orthotropic steel deck stiffened by closed section ribs



写真－1 疲労試験状況

Photo 1 Fatigue test of repair method



写真－2 実橋試験施工状況

Photo 2 Application test at actual bridge

瀬戸大橋管理路の劣化度評価及び補修方法に関する検討

A Study on Deterioration Grading and Repair Method of Maintenance Ways at Seto-Ohashi Bridges



補修前

補修後

写真－3 管理路補修状況

Photo 3 Before and after repair of maintenance way



写真－4 管理路手摺現地撤去状況

Photo 4 Dismantlement of hand rail of maintenance way

因島大橋・大島大橋ハンガーロープ塗替え塗装

Suspender rope re-painting of Innoshima Bridge and Ohshima Bridge



写真-5 因島大橋用ケレン装置

Photo 5 Surface treatment machine for Innoshima Bridge



写真-6 大島大橋 ゴンドラによる塗装状況

Photo 6 Painting work by gondola in Ohmishima Bridge

来島海峡大橋ハンガーロープ定着部調査

Investigation for the anchor zone of suspender rope of Kurushima-Kaikyo Bridge



写真-7 ハンガーピン抜き取り状況

Photo 7 Extraction of pin



写真-8 ラッピング開放状況

Photo 8 Unwrapping of rubber sheet

技術開発の推進

Technology Development

長大橋技術センター長

荻原 勝也

Katsuya Ogihara

技術開発の必要性

貴重な社会資本である本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という。）を200年以上の長期にわたり利用していただけるよう管理するためには、常により合理的に維持管理できるよう追及してゆくことが必要である。

橋梁の維持管理とは別の様々な分野において、新しい技術の開発が進められている。たとえば、電気自動車の実用化、ICT（インフォメーションアンドコミュニケーションテクノロジー）の発展、ドローンの活用、レーザーやステレオカメラの活用による対象物の識別などが思い当たる。

一方、現在管理している本四連絡橋の状況も時間とともに変化しており想定外の事象も発生している。たとえば、予想より早い一部の塗装の劣化や剥離などが発生しており原因究明を進めている。

このように新しく発生した維持管理上の課題を解決するため、またこれまで実施してきた点検方法や補修方法をより合理的にするため、別の分野で開発されてくるその時々での最新の技術を取り入れて、技術開発を継続的に進めてゆくことが、これからも必要であると考えている。

技術開発の体制

本四高速の技術開発を推進する体制は、保全技術交流会議がそのコアとなり技術開発全体をコントロールしており、長大橋技術センターが技術開発の総括の役割を担っている。

人材育成

技術開発を行うには、体制だけでなく優秀な人材が必要であり、特に重要なのは技術開発を担う若手技術者の育成である。

若手技術者に本四連絡橋の建設に係る技術を継承することも、重要な使命であると考えている。本四高速では建設技術の継承のため、若手技術者を対象に長大吊橋、長大斜張橋の計画・設計・施工に係る建設技術を習得させる社内プロジェクトを実施している。これにより維持管理の段階において、設計・施工時点での重要性を理解した安全な業務をおこなうことができると考えている。たとえば長大橋の設計時の耐風安定性に関する知見は、維持管理業務上の安全を確保する上で、時として非常に重要となるからである。

維持管理に係る技術についても、長大橋梁、道路、機械、電気通信の各分野において、現地で定期的に現場研修会を実施し、若手技術者に知識と経験を習得させる体制となっている。

技術開発を担う人材に期待すること

本四連絡橋の建設を行っている時代は、橋梁の建設に向けて様々な検討・開発が進められてきたが、その達成時期は橋梁の建設に間に合うよう明確であった。

一方、現在のような維持管理の時代を迎えると、建設期間に比べ管理期間がはるかに長いことから、課題に対する技術開発期間が比較的長く、しばしば日常の維持管理業務を優先することがありがちである。

しかしながら技術開発は常に必要であり、タイムリーにその成果を本四連絡橋の維持管理に反映させることは、より合理的な維持管理のために大切である。

技術開発を担当する人材に期待することは、前向きで柔軟な発想である。日常の業務をこなすだけではなく、少しでもよくする方法を考え、提案することが大切である。

また広い視野と論理的な考えも必要である。課題を解決するために、またより良くするためにはどうすれば一番効果的か、現実的にできることの中ではどうするのがよいのか、別の方法では考えられないかなど、できることを見つけ出して解決してゆくことが必要であり、そのために視野を広げ、論理的に考えることが必要である。

もう一つ期待することは、わかりやすく説明する技術である。わかりやすく説明し、より多くの方に技術開発の内容を、さらには本四高速の実施している事業を理解してもらえることが非常に重要であると感じている。

最後に

本四連絡橋の維持管理のための技術開発の推進は、現在のそしてこれからの維持管理を担う若手技術者の活躍にかかっている。若手技術者による技術開発の推進により本四連絡橋が200年以上の長期にわたり利用していただけるものになると考えている。

また、若手技術者の活躍を支えるのが長大橋技術センターの大事な役割であり、たとえば国内外への技術論文の投稿及び発表を支援するなど大いに若手技術者をサポートしたいと考えている。

鋼床版Uリブとデッキ間のビード貫通亀裂に対する TRSを用いた下面補修法の開発

Development of repair method using Thread Rolling Screw for bead-penetrating crack in orthotropic steel deck stiffened
by closed section ribs

溝上 善昭 Yoshiaki Mizokami

長大橋技術センター
診断・構造グループサブリーダー

森山 彰 Akira Moriyama

長大橋技術センター
診断・構造グループリーダー

貴志 友基 Yuki Kishi

鳴門管理センター
橋梁維持課長

概要

Uリブ鋼床版では、供用年数の増加とともに大型車に起因する疲労亀裂が発生している。そのうちデッキUリブ溶接部のルート部からビード表面に向かって進展するビード貫通亀裂に対し、いくつかの補修方法が研究・施工されている。しかしながら、鋼床版下面からのみで施工可能かつ効果的な補修方法は、いまだ開発途上である。

本報文では、スレッドローリングねじ(TRS : Thread Rolling Screw)を用い鋼床版下面からのみで施工可能な当て板補修工法を開発し、その性能を確認する目的で行った疲労試験の結果及び実橋での試験施工について報告する。

In orthotropic steel decks stiffened by closed section ribs, fatigue cracks resulting from large vehicles have been observed with the increase of the service years. The cracks found in trough-deck welds are bead-penetrating type. Several repair methods have been studied for these bead-penetrating cracks so far. However, effective methods that is applicable from the underside of the deck are still under development. In this paper, development of a repair method using Thread Rolling Screw from the underside of the deck, fatigue test results and application test at the actual bridge are described.

1. はじめに

鋼床版は軽量かつ架設工期が短く、設計の自由度が高いため長大橋や都市高速において多く採用されている。一方、重交通路線を中心に道路橋の鋼床版に疲労亀裂が発生・進展した事例が数多く報告されている^{1)~4)}。本州四国連絡橋の鋼床版でも、平成15年に図-1に示すデッキプレート（以下「デッキ」という。）とUリブのすみ肉溶接部のルート部から溶接ビード表面に向かって進展し溶接部を貫通する疲労亀裂（以下「ビード貫通亀裂」という。）が初めて発見されてから、現在までに数十箇所が確認されている。

既往の補修工法として、Uリブ取り替えや当て板等をデッキ上面から高力ボルトを落とし込んで施工する工法⁴⁾、下面からの溶接補修工法⁵⁾、下面からのスタッド溶着ボルトによる当て板工法^{6)~9)}が開発され施工されているが、それぞれに以下のような課題がある。

Uリブ取り替えや当て板等をデッキ上面から高力ボルトを落とし込んで施工する工法では、舗装を切削する必

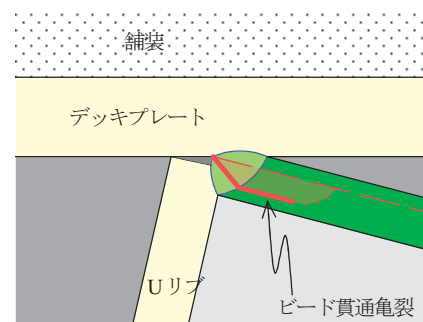


図-1 ビード貫通亀裂

Fig.1 Bead-penetrating crack

要があり交通規制が伴う。そのため、重交通路線や代替路線のない海峡部長大橋での実施は社会的影響が大きい。また、部分的な舗装切削・復旧は、舗装目地による防水性能低下も懸念される。

下面からの溶接補修工法では、溶接姿勢が上向きになるため品質の確保が難しい。また、溶接施工時に通行止めができない場合は、交通振動を抑えることができない

ため、溶接品質の低下が懸念される。更に、Uリブ内面からの溶接は困難であり、通常はUリブ外面からのみの溶接とするため完全溶け込みにできず、ルート部に不溶着部が残る。つまり再溶接による補修では、溶接品質の確保が難しく、ルート部からの亀裂が再発する懸念が残る。文献10)では、補修溶接のサイズが小さい場合にはビード亀裂が再発し、逆に大きい場合にはルート部からデッキ上面に向かって進展する亀裂（以下「デッキ亀裂」という。）が発生しやすいことが報告されている。

また、下面からのスタッド溶着ボルトによる当て板工法では、スタッドボルトの溶接が上向き施工になるため品質確保が難しいことが想定される。その上、活荷重による応力変化が大きいデッキへスタッド溶接することから、溶接部からデッキへ進展する亀裂の発生が懸念される。

ビード貫通亀裂の補修方法は、以上のようにいくつかの補修方法が提案されているが、鋼床版下面からのみ施工可能かつ有効な補修方法がないのが現状である。

本論文で提案する工法は、交通規制や舗装の切削等が不要で、デッキ下面からのみで施工が可能で、かつ効果的な当て板補修工法であり、当て板のデッキ側の接合に従来のトルシア型高力ボルトによる摩擦接合に代わり、デッキ下面から削孔し、ボルトによる支圧接合とする方法である。また、効率的とするため削孔後にタッピング工程が不要となるTRSを使用する工法を開発した。

支圧接合の材料と方法は、比較のため鋼板に孔をあけたあとにタップを加工し通常のボルトをねじ込む方式のタップボルト（以下「TB」という。）と、鋼板に孔をあけたあとにねじ自身が孔壁にめねじを形成しながらねじ込むスレッドローリングねじを用いた方式（以下「TRS」(Thread Rolling Screw)という。）とした^{11)~13)}。ここでは、本補修工法の性能を確認する目的に、実物大の試験体（図-2）を用いた疲労試験を行った結果、及び実橋での試験施工について報告する。

2. 疲労試験の概要

2.1 試験体

試験体の寸法は、幅2000mm、長さ2600mmとし、高さはNo.1試験体が1000mm、No.2試験体が900mmであり、2本の主桁間に2本の横リブと3本のUリブ（呼び名：320×260×8-40）を有している。Uリブ間隔は610mm、横リブ間隔は2000mmとした。主要部材の板厚と材質は、デッキが12mm(SM490Y)、Uリブが8mm(SM490Y)、横リブウェブが9mm(SM400)とした。

2.2 当て板構造と接合方法

当て板の板厚と材質は、Uリブと同じとした。当て板

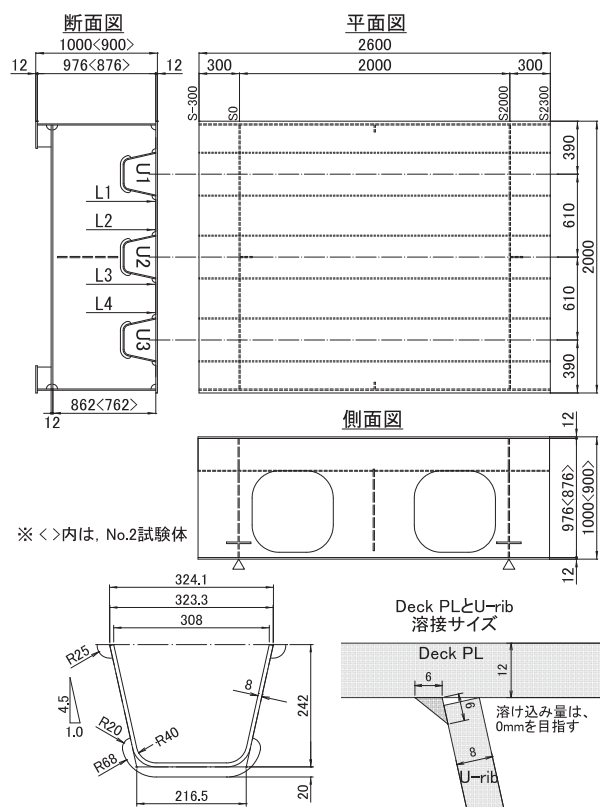


図-2 試験体

Fig.2 Test model

試験位置	L1(HTB)	L2(TB)	L3、L4(TRS)
詳細図			

図-3 当て板の接合詳細図

Fig.3 Detail of plate splicing

を行う箇所は、図-2に示すL1からL4とした。また、当て板範囲は、S-300からS2000までとし、横リブから600mmと1400mmの位置で当て板を分割した。デッキとUリブの溶接は、脚長6mm、溶け込み深さ0mmを目標として製作した。

当て板の接合方法は、図-3に示す3種類とし、提案する当て板工法と、その評価基準となる既往の上面からのトルシア型高力ボルト（以下「HTB」という。）を用いた当て板工法をL1～L4の溶接線ごとに実施した。デッキ側の接合方法は、L1がHTB(M20)による摩擦接合、L2がTB(M16)による支圧接合、L3とL4がTRS($\phi 16$)による支圧接合とした。写真-1にTRSによる当て板接合後のデッキ上面の状況を示す。デッキ上面とTRS上端はほぼ同一面となっている。Uリブ側の接合方法は、全てワンサイド高力ボルト(MUTF20)による摩擦接合とした。

2.3 荷重方法

荷重は、3台のジャッキを用いて、S0、S600、S1200またはS800、S1400、S2000の3断面で行った。なお、車輪走行を模擬するため、3台のジャッキ間では $2/3\pi(120^\circ)$ の位相差をつけた。繰り返し荷重速度は3Hzとした。

荷重は、文献4)を参考に最大軸重260kNとし、荷重梁を使いダブルタイヤ2組を模した荷重板(200mm×200mm)×2枚×2組当たり、荷重範囲260kN(20-280kN)とした。

荷重位置は、ビード亀裂が生じやすいデッキとUリブの溶接ビード直上とする直上荷重ケースと、デッキ亀裂が生じやすい溶接ビードを跨ぐ挟み込み荷重ケースを行った。写真-2に疲労試験状況、図-4に荷重パターンを示す。

2.4 試験方法

(1) No.1試験体

試験は、ビード貫通亀裂を再現し亀裂発生後に当て板を実施する事後保全ケースと、荷重前の亀裂がない状態から当て板を行う予防保全ケースを予定していた。また、予防保全ケースでは、溶接を残したまま当て板するケースと、亀裂の起点となるルート部を無くすため溶接を切削し当て板を施工するケースを予定していた。しかしながら、No.1試験体を製作後にデッキとUリブの溶接部の溶け込み量を確認したところ、0mmの目標に対し4mmを超える溶け込みが確認された（写真-3(a)）。そのため、ビード貫通亀裂の再現が困難と推察されたため、試験体を再製作することとし、No.1試験体では荷重前に溶接ビードを切削し、その後に当て板を施工する予防保全ケースの試験を行った。

切削範囲は、荷重板の範囲+10mmとし、デッキまで削り込まないように注意しながら支間部はディスクグラインダー、横リブ交差部はバークグラインダーにより施工した。支間部の切削イメージと状況を図-5に示す。



写真-1 TRS 施工後のデッキ上面
Photo 1 Upper side of the deck after repair

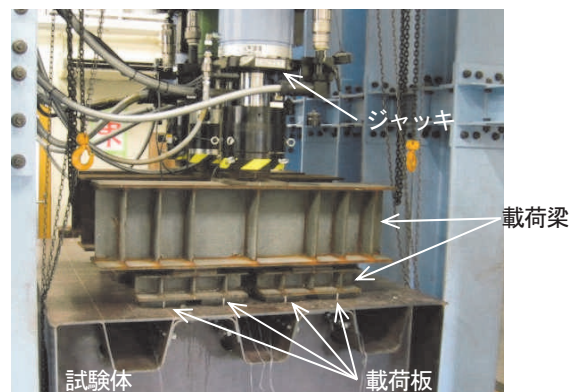


写真-2 疲労試験の状況
Photo 2 Fatigue test

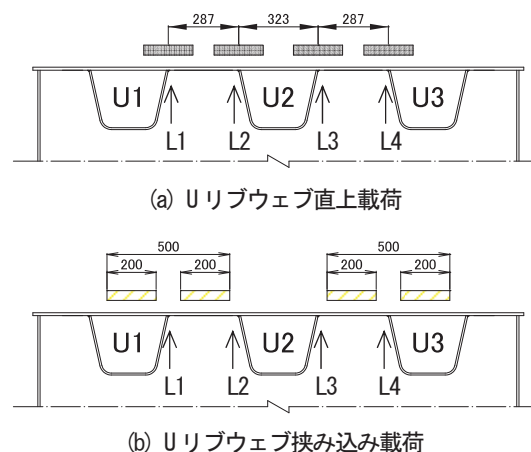
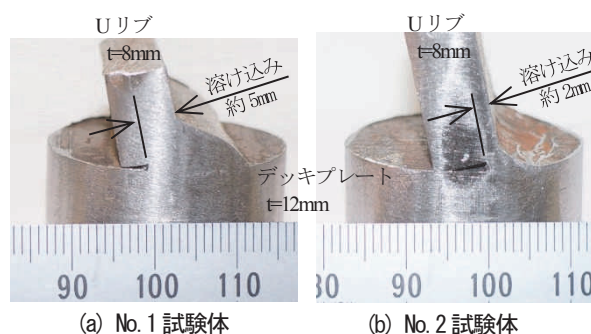


図-4 荷重パターン

Fig.4 Loading pattern



(a) No. 1 試験体

(b) No. 2 試験体

写真-3 溶接溶け込み確認状況
Photo 3 Confirmation of fusion depth

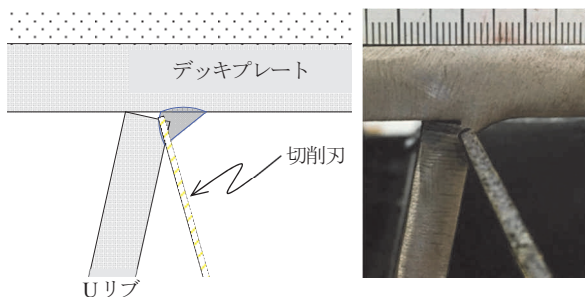


図-5 溶接ビード切削

Fig.5 Bead cut

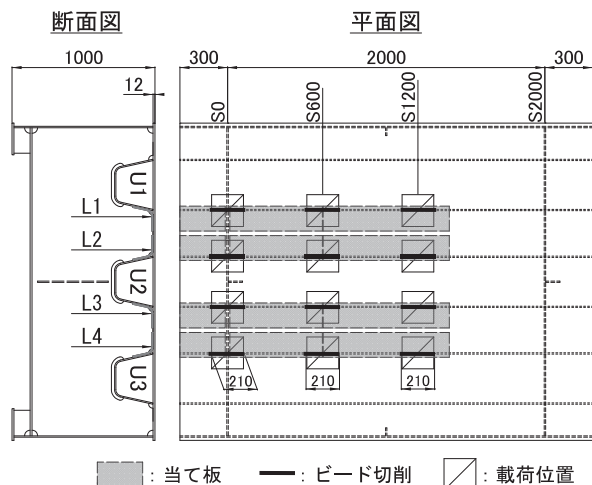


図-6 No. 1 試験体

Fig.6 Test model 1

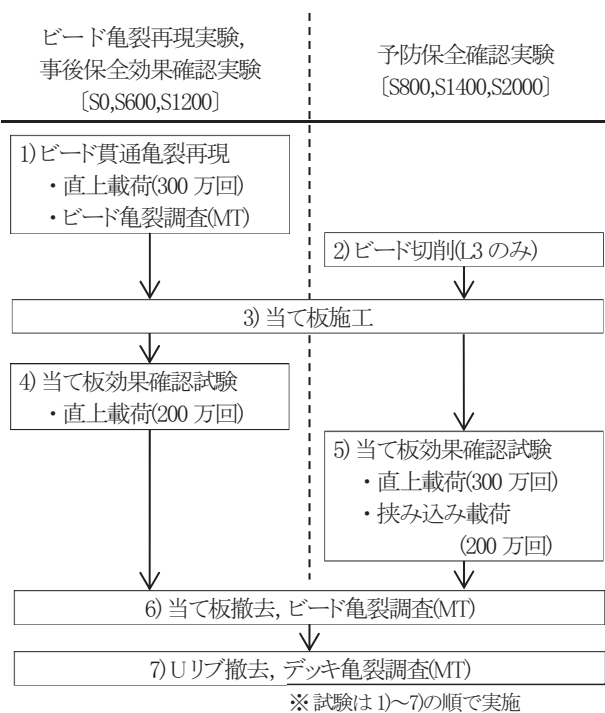


図-7 No. 2 試験体 試験手順

Fig.7 Test flow of test model 2

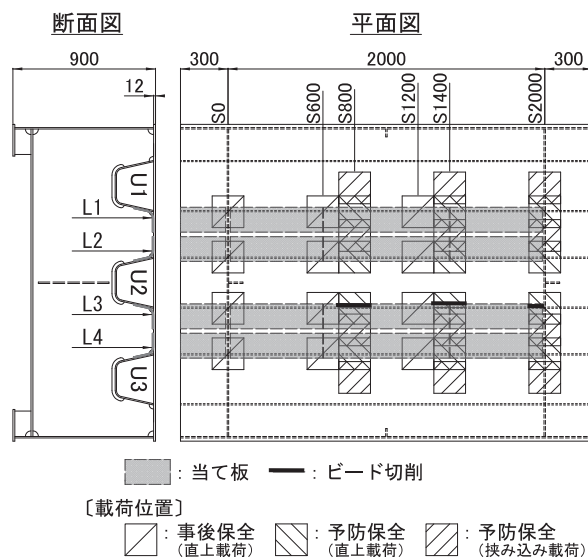


図-8 No. 2 試験体

Fig.8 Test model 2

载荷位置は、L1～L4の溶接線の直上载荷とした。ビード切削範囲と载荷位置を図-6に示す。

(2) No.2試験体

本試験体のデッキとUリブの溶接部の溶け込み量は0mmの目標に対し2mm以下である(写真-3(b))ことから、ビード貫通亀裂の再現が可能であり、試験をする上で問題ないと判断し試験を行った。载荷試験と当て板等の試験の流れを図-7に、载荷パターンと载荷位置を図-8に示す。

試験の2つのケースは、ビード貫通亀裂の発生後当て板施工する事後保全ケースと、Uリブとデッキの溶接部を事前に切削し当て板施工をしておく予防保全ケースである。

载荷位置は、事後保全ケースでは横リブ交差部のS0、支間部のS600とS1200の軸線上でL1～L4溶接線の直上载荷とし、予防保全ケースでは支間部のS800とS1400、横リブ交差部のS2000の軸線上でL1～L4溶接線の直上载荷と、L1とL4の溶接線を跨ぐ挟み込み载荷を行った。

3. 疲労試験の結果

3.1 No. 1試験体

直上载荷300万回後、亀裂の発生状況及びボルトの緩み、ボルト孔周辺の変状を調査した。その結果、HTB、TB、TRSともに緩み等の不具合は認められなかった。また、当て板を外しデッキ、Uリブ及び当て板のボルト孔部を磁気探傷(以下「MT」という。)したが、亀裂発生は全く認められなかった。更に、载荷位置のデッキとUリブをガス切断で切り出しルート部からのデッキ亀裂の有無をMTにより調査したがデッキ亀裂発生は認めら

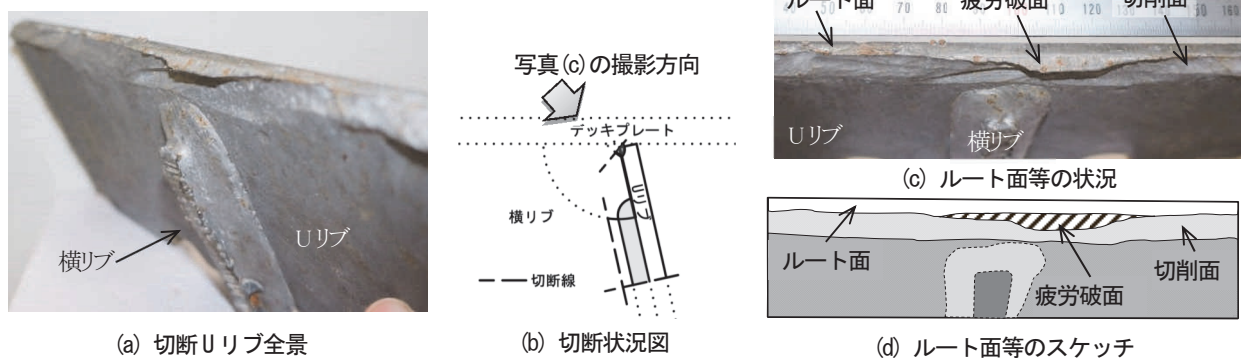


図-9 No.1 試験体 Uリブのデッキ側の側面（切断後，S0 のL2）

Fig.9 Deck side of trough rib of test model 1 (After cutting, S0-L2)

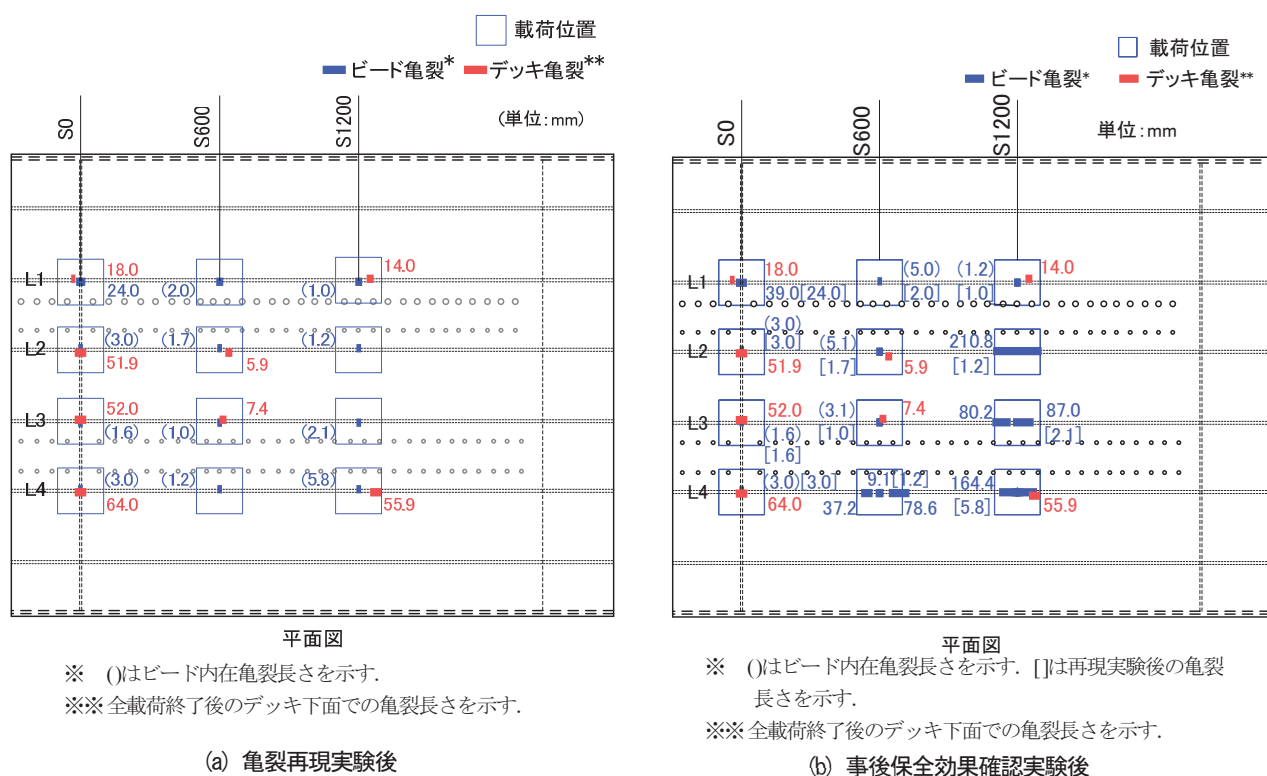


図-10 亀裂分布図

Fig.10 Crack distribution

れなかった。Uリブのデッキ側面を観察したところ、ビード切削の施工時に一部ビードが残っても、繰り返し載荷によりビード表面側に亀裂が進展し、結果的にビード切断した状態になることが確認できた（図-9）。また、分割した当て板の境界部についても亀裂等の変状は認められなかった。

3.2 No.2試験体 ビード貫通亀裂再現実験

直上載荷300万回（S0は100万回までに亀裂が発生したため、100万回で停止）後の亀裂分布図を図-10(a)に示す。ビード亀裂の確認は、再現実験の載荷直後にビード表面に対しMTを行った。デッキ亀裂はUリブを除去しなければ調査ができないため、全ての載荷パターン終了後にUリブを除去してデッキ下面に対しMTを行った。

ビード亀裂は、S0のL1でビード表面亀裂長さ24mmの

貫通亀裂が生じたが、他の11箇所では表面に貫通した亀裂は無く、表面から深さ3～5mmで切削したところ長さ1～6mm程度の貫通に至っていない内在している亀裂（以下「ビード内在亀裂」という。）が生じていた。それら11箇所のうち7箇所では6～60mm程度のデッキ方向に進展している亀裂が生じており、そのためにビードを貫通する亀裂に至らなかったものと考えられる。残り4箇所ではデッキに亀裂は生じていない。

3.3 No.2試験体 事後保全効果確認実験

ビード貫通及び内在亀裂が発生した状況で全て当て板を施し、直上載荷で更に200万回の載荷を行った後の亀裂分布図を図-10(b)に示す。ビード亀裂は事後保全効果確認実験の載荷後に、デッキ亀裂は全ての載荷パターン終了後にUリブを除去してデッキ下面に対しMTを行った。

S0のうち亀裂再現実験でビード貫通亀裂が生じていたL1では、表面長さ24mmが39mmに進展した。L2、L3ではビード亀裂は進展しなかったものの、長さ50mmを超えるデッキ亀裂が生じた。

S600とS1200のビード内在亀裂が生じた8箇所のうち4箇所では亀裂がビード表面まで到達し、ビード表面の亀裂長さは120～200mm程度である。うち1箇所(S1200、L4)では、ビード貫通亀裂の端部からデッキ亀裂が生じていた。残りの4箇所ではビード内在亀裂の進展がほとんど見られないが、その中の3箇所ですデッキ亀裂が発生した。

したがって、ビードを残したまま当て板補修を行った場合には、ビード亀裂やデッキ亀裂が発生・進展することが確認された。

3.4 No.2試験体 予防保全効果確認実験

疲労試験前に当て板し、直上載荷で300万回、挟み込み載荷で200万回載荷後の亀裂分布図を図-11に示す。ビード亀裂は当て板を取り外しデッキとUリブの溶接部を、デッキ亀裂はUリブを除去してデッキ下面をそれぞれMTし確認した結果である。

載荷位置の溶接ビードを切削したL3では、ビード切削部にデッキ亀裂は発生しなかった。一方、ビード切削端部にはビード亀裂とデッキ亀裂が発生した。すなわち、当て板端部には亀裂の再発を抑制・監視するため先端部を削孔¹⁴⁾するなど配慮が必要である。

L2とL4では、全ての箇所です表面長さ40～90mm程度のビード貫通亀裂を確認したが、デッキ亀裂は発生していなかった。

L1では、全ての箇所ですビード貫通亀裂とデッキ亀裂を確認した。亀裂長さは、ビード貫通亀裂が10～50mm程度、デッキ亀裂が30～70mm程度であった。

以上よりL1とL4では同じ載荷条件であるが、亀裂の発生状況は異なる。これは、当て板の接合方法(L1：HTB、L4：TRS)の違いと、溶接の溶け込み量の違いの2つの要因が関連していると考えられる。

また、ビードを残して当て板した場合には、ビード亀裂とデッキ亀裂が生じた。一方、ビードを切削した箇所は、ビード切削端部の一部で亀裂が発生したところがあったが、切削部では亀裂は発生していない。このことから、ビードを残すと亀裂が発生するので、切削により取り除く必要がある。

4. 実橋への適用

4.1 施工方法

TRS (写真-4) による当て板を実橋へ適用するに先立ち、疲労試験での結果を踏まえ施工手順を示したマニュアル (案) を作成し、以下の手順で実施することと

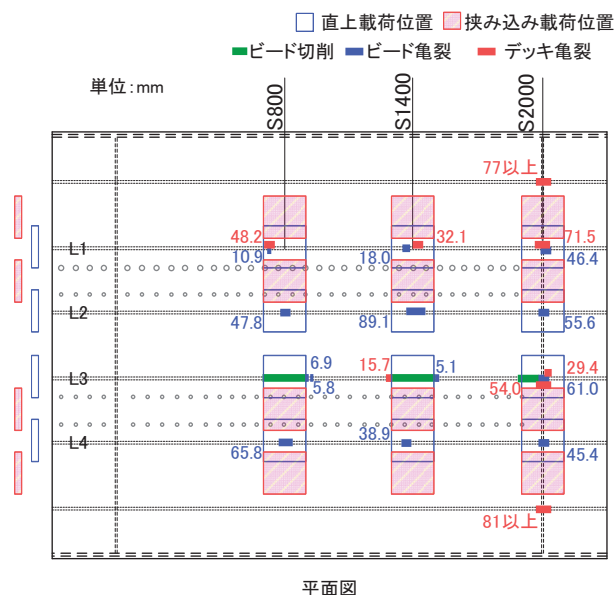


図-11 亀裂分布図(最終：全載荷後)

Fig.11 Crack distribution (after fatigue test)

した。

- (1) 当て板範囲ビード両端部の削孔
- (2) デッキ-Uリブ溶接部の切削 (写真-5)
- (3) 当て板の仮固定 (写真-6)
- (4) デッキ側TRS φ 12用ボルト孔の削孔 (削孔径 φ 11.5、写真-6)
- (5) 当て板仮留め：TRS φ 12による仮留め
- (6) Uリブ側へMUTF20用ボルト孔の削孔
- (7) Uリブ側のMUTF20のボルト群のうち中心付近の2本を1次締め
- (8) デッキ側へTRS φ 16用ボルト孔の削孔 (削孔径 φ 15.5)
- (9) デッキ側TRS φ 16の締め込み (写真-7)
- (10) Uリブ側のMUTF20のボルト群全数を1次締め
- (11) Uリブ側のMUTF20のボルト群全数を本締め
- (12) シーリング及び塗装による防せい

なお、手順の(8)～(9)は、1本ずつ当て板端部から施工し、全数のTRS φ 16締め込み後に(10)以降の施工を行った。写真-8に当て板設置完了状況を示す。

また、施工にあたり東大阪橋梁維持管理研究会と共同で、いくつか特殊な工具を開発した。以下に代表的な開発工具を説明する。

- ・ドリルストッパー内蔵の切削刃：デッキ側の削孔時に、舗装を切削しないよう削孔長さを調整するもの (写真-9)。
- ・磁石付きセンターピン：Uリブ側削孔時に、削孔コアがUリブ内に落ち込まないようにするもの (写真-10)。

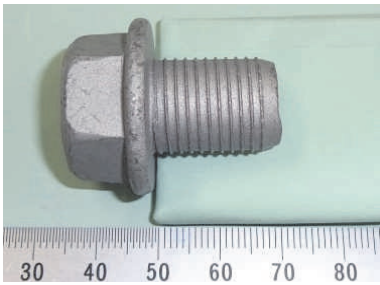


写真-4 TRS
Photo 4 TRS



写真-5 溶接切削
Photo 5 Bead cut

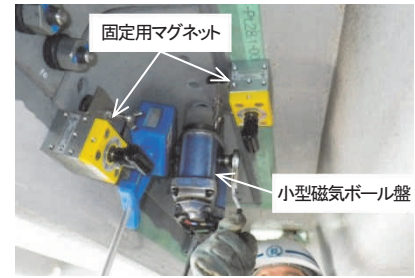


写真-6 ボルト孔の削孔
Photo 6 Perforation of bolt hole



写真-7 TRS 締め込み
Photo 7 TRS tightening

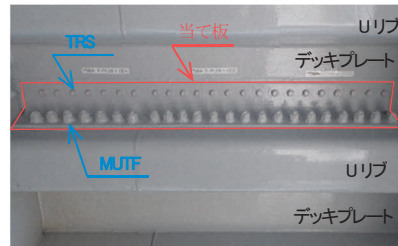


写真-8 施工完了
Photo 8 Application completed

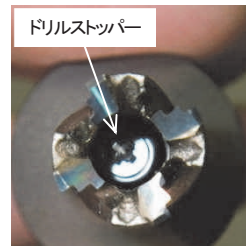


写真-9 デッキ側削孔刃
Photo 9 Cutting blade for deck plate



写真-10 Uリブ側削孔刃
Photo 10 Cutting blade for trough rib

4.2 施工試験

実橋での施工に先立ち、作業員の訓練と開発した工具等の有効性を確認するため原寸大供試体を製作し、工場での施工試験を実施した。以下に確認内容の一部を示す。

- ・ Uリブ支間部溶接切削時の切削刃の当て方や切削深さの見極め方。
- ・ Uリブ支間部と横リブ交差部の溶接切削時の切削工具の使い分け範囲。
- ・ デッキ側削孔用に開発したドリルストッパーによる、デッキ上面への削孔刃の飛び出しが1mm以下で施工できる。
- ・ 当て板をガイドとして削孔する際に、マグネット工具による仮固定で、当て板の脱落、ズレ防止が確実に実施できる。
- ・ 上向きTRS締め込み時の鉛直性確保用に開発した治具により、鉛直にTRSを施工できる。

上記以外にも各手順での施工能力や作業内容について確認できた。

4.3 実施工（試験施工）

施工は、橋梁常設の点検補修作業車（図-12）を用いて実施し、当て板設置時は直上車線を規制し作業を行った。また、施工範囲は、横リブを挟む約2m区間とし、人力による上向き施工となるため当て板は1枚当たり10kg程度以下となるように3分割している。実施工は、工場での施工試験で確認した手順で順調に施工可能であった。実施工に要した日数を表-1に示す。初めての施工であったため、当て板の施工には1日/枚を要した。

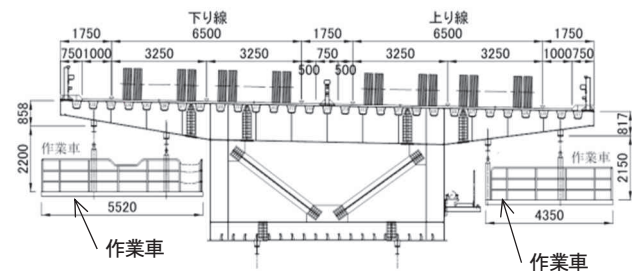


図-12 点検補修作業車
Fig.12 Maintenance vehicle

表-1 実施工工程表
Table 1 Time schedule

	1日目	2日目	3日目	4日目	5日目	6日目	7日目	8日目	9日目
素地調整									
表面処理・保護塗装 (有機ジンク層塗り)									
当て板設置 (切削～ボルト締め付け)									
防食・塗装									
調査孔密閉									

5. おわりに

5.1 疲労試験結果

(1) 亀裂再現状況

ビード亀裂に関しては、横リブ交差部の1箇所のみでビード貫通亀裂が生じ、他の3箇所と縦リブ支間部の8箇所、計11箇所では、ビード内在亀裂が確認された。また、

それら11箇所のうち、交差部3箇所と支間部4箇所です
デッキ亀裂が生じていた。

(2) 事後保全対策効果

ビードを残して当て板補修を施した場合、ビード亀裂もデッキ亀裂も発生・進展したことから、当て板補修時にはビードを切削する必要があることを確認できた。

(3) 予防保全対策効果

予防保全対策として、デッキとUリブの溶接ビードを切削し当て板をすることにより、デッキ亀裂を防止できることが確認された。また、切削時に部分的に切削残りが生じても繰り返し載荷によって残ったビードは破断し、その後、デッキ亀裂は発生しないことを確認した。

ビードを切削した範囲では、ビード亀裂及びデッキ亀裂の発生は認められなかった。ただし、切削端部においてビード亀裂、デッキ亀裂が生じる場合があった。したがって、切削端部では削孔による亀裂進展抑止などの処置を行うとともに、定期的な監視を行う必要がある。

(4) 接合方法の評価

HTB、TB、TRSの3種類の接合方法とも、ボルトの緩みやボルト孔からの亀裂発生などの変状が生じないことを確認した。また、事後保全及び予防保全のケースとも接合方法による亀裂発生状況に大きな違いは認められず、実験を行った繰り返し載荷荷重と回数の範囲内ではほぼ同等であると評価できる。

また、施工性に関しては、TBとTRSは下面からのみの作業で当て板施工が可能であり、特にTRSはTBと比べめねじ形成工程が省略できることから、より施工性が高く有利な施工方法であることが検証できた。

5.2 実施工

開発した補修工法により舗装を傷めることなく、下面からのみの作業による当て板補修が可能であることが確認できた。今後は施工区間の両端の調査孔を経過観察する等、本補修工法の耐久性等を確認していく予定である。また、施工効率の改善や使用工具の改良に加え本補修工法をより改善し、順次ビード貫通亀裂の補修を進めていく予定である。

謝辞

鋼床版Uリブとデッキ間のビード貫通亀裂に対するTRSを用いた下面補修法の開発は、関西大学の坂野昌弘教授のご助言とご指導により開発でき実施工まで到達できたものである。また、本補修法に対する様々な施工治具の開発に関しては東大阪橋梁維持管理研究会、疲労試験に関しては関西大学学生の楠元崇志氏、山岡大輔氏、坂本千洋氏に多大な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編，pp.129-157，pp.193-213，2014.3
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，pp.1-55，2002.3
- 3) 平林泰明，牛越裕幸，木ノ本剛：首都高速道路における鋼床版損傷，鋼構造と橋に関するシンポジウム報告集，Vol.10，pp.39-53，2007.8
- 4) (財) 阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策[三訂版]，pp.7-15，pp.80-99，2014.3
- 5) 川上順子，高田佳彦，坂野昌弘：鋼床版の疲労損傷に対する溶接を用いた補修補強工法に関する検討，鋼構造年次論文報告集，第15巻，pp.371-376，2007.11
- 6) 田畑晶子，青木康素，小野秀一，山口隆司：Uリブ鋼床版のスタッドボルトを用いた補強方法の提案，土木学会第69回年次学術講演会，I-466，2014.9
- 7) 青木康素，田畑晶子，小野秀一，渡辺真至，馬場敏，山口隆司：スタッドボルトを用いて当て板したUリブ鋼床版の載荷試験，土木学会第69回年次学術講演会，I-467，2014.9
- 8) 中井勉，田畑晶子，小野秀一，山口隆司：スタッドボルトを用いて当て板したUリブ鋼床版の実物大試験体による静的載荷試験，土木学会第70回年次学術講演会，I-385，2015.9
- 9) 小野秀一，渡辺真至，田畑晶子，中井勉，山口隆司，儀賀大己：スタッドボルトを用いて当て板したUリブ鋼床版の輪荷重疲労試験，土木学会第70回年次学術講演会，I-386，2015.9
- 10) 坂野昌弘，西田尚人，田畑晶子，杉山裕樹，丹波寛夫：鋼床版Uリブとデッキ間のビード貫通亀裂補修溶接部の疲労耐久性評価，鋼構造年次論文報告集，第20巻，pp.565-570，2012.11
- 11) 鈴木博之：スレッドローリングねじで接合された継手の強度に関する実験的研究，構造工学論文集Vol.61 A，pp.614-626，2015.3
- 12) 奥村淳弘，坂野昌弘，藤永政司，藤井勝義：φ16 スレッドローリングスクリューのせん断強度，土木学会第70回年次学術講演会，CS4-007，2015.9
- 13) 奥村淳弘，坂野昌弘，藤永政司，藤井勝義，西山圭介：φ16スレッドローリングスクリューのせん断強度，材料学会若手学生研究発表会，2015.10
- 14) 溝上善昭，花井拓，鎌田将史，新野貴大，神田隼太：Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂の進展特性，土木学会第71回年次学術講演会，I-386，2016.9

瀬戸大橋吊橋（下津井瀬戸大橋、南北備讃瀬戸大橋） の耐震性能照査、補強設計

Seismic retrofit design of Seto-Ohashi suspension bridges (Shimotsui-Seto, Kita Bisan-Seto, and Minami Bisan-Seto Bridges)

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

河藤 千尋 Chihiro Kawatoh

長大橋技術センター
総括・耐震グループリーダー

長大橋技術センター
総括・耐震グループサブリーダー

概要

瀬戸大橋の耐震補強は、道路鉄道併用区間約12kmについて、平成25年度から約8年間で終える予定で実施中である。ここでは、下津井瀬戸大橋、北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋の吊橋3橋の耐震性能照査結果及び耐震補強設計について報告を行うものである。

耐震性能照査では、3橋ともセンターステイが破断し、道路桁支承の一部が損傷する結果となったが、主塔、補剛桁など主要部材には大きな損傷は見られなかった。照査結果を受けて行った補強設計では、センターステイの破断は許容するものとし、道路桁支承部を直接補強する対策を採用するものとした。

Seismic retrofit of the Seto-Ohashi Bridges and approach viaducts, approximately 12km-long highway-railway combined section, will be completed in 8 years from the execution of 2013. Seismic retrofit design has been conducted with considering retrofit work schedule. This paper presents seismic retrofit design for Shimotsui-Seto, Kita Bisan-Seto, and Minami Bisan-Seto Bridges.

In the seismic performance verification, center stays will be broken and some of the road girder bearings will be damaged at all three bridges, but damages in major members such as the main towers and stiffening girders will not occur. In the seismic retrofit design, it was decided the breakage of center stay was allowed and retrofitting measures to the road girder bearings were adopted.

1. はじめに

瀬戸大橋の耐震補強は平成25年度から本格的に着手され、平成32年度の完了を目指し現在実施中である。瀬戸大橋を代表する吊橋3橋（下津井瀬戸大橋、南北備讃瀬戸大橋）については、平成26年度から耐震性能照査を開始した。

瀬戸大橋は道路鉄道併用橋であり、今回耐震性能照査、補強設計した吊橋3橋は、中央支間長で国内第2、5、6位の長さを誇る長大吊橋である。また海上という腐食環境の過酷な条件、道路鉄道併用橋という特殊条件下を考慮し、維持管理にも万全を期さねばならないため、耐震対策案の詳細については、それらの観点も考慮して補強設計を実施した。また、対象とする吊橋3橋の耐震性能照査、補強設計については、道路橋示方書¹⁾（以下「道示」という。）の適用外であり、また道路鉄道併用橋の特殊性なども鑑み、当社が設置した本四耐震補強検討委員会において、その妥当性の確認を行いながら実施した。

耐震性能照査の結果、3橋に共通する損傷部位は、センターステイ及び道路桁支承となった。このうちセン

ターステイは、3橋とも建設時の設計から地震時で破断が想定されていること、また今回のセンターステイの破断を考慮した地震応答解析を行った結果、補剛桁が橋軸方向変位により、エンドストッパーに衝突しないことが確認できたことから、センターステイの破断は許容するものとした。

橋梁個別では、北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋の残りの部位に損傷は見られなかった。下津井瀬戸大橋では、主横トラスの一部に損傷が生じる結果となったが、損傷発生箇所付近で解析モデルに反映できていない部材などの考慮、またFEMモデルによる損傷程度の検討を行った結果、予想される損傷は軽微であり、構造安全性、供用性に影響を与えるものでないと判断し、損傷を許容するものとした。

耐震性能照査の結果を受け、耐震補強設計を行い、平成28年末に対象吊橋3橋の耐震補強工事の発注がなされた。

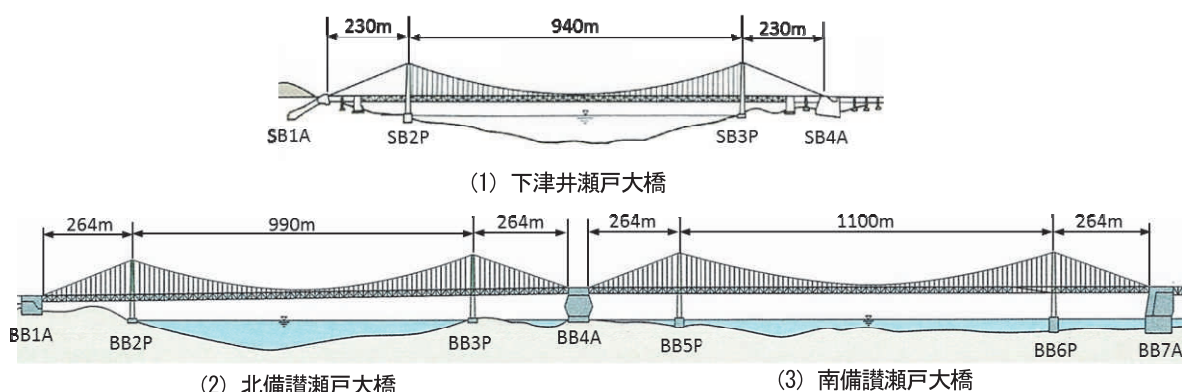


図-1 橋梁一般図

Fig.1 General view

表-1 橋梁概要

Table 1 Outline of bridges

橋 名	下津井瀬戸大橋	北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋
形 式	張出し径間付き単径間補剛トラス吊橋	3径間連続補剛トラス吊橋
道路床版形式	鋼床版(舗装厚75mm) 中央分離帯部及び路肩部はオープングレーチング	
橋 長	1400m	(北)1538m、(南)1648m
支 間	ケーブル: 230.0+940.0+230.0m 補剛桁: 130.0+940.0+130.0m	ケーブル: (北)274.0+990.0+274.0m、(南)274.0+1100.0+274.0m 補剛桁: (北)264.0+990.0+264.0m、(南)264.0+1100.0+264.0m
平面線形	直線	
縦断勾配	0.4%、1%直線勾配	1%直線勾配
適用耐震基準	耐震設計基準・同解説(本四公団、昭和52年)等	

2. 橋梁概要

下津井瀬戸大橋は岡山、香川県境の下津井瀬戸に架かる橋長1,400mの張出し径間付き単径間補剛トラス吊橋である。また、北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋は与島から坂出市番の州へ至る3径間連続補剛トラス吊橋であり2連吊橋を構成している。これらは道路鉄道併用橋としては世界最大級の長大吊橋である。橋梁一般図を図-1に、橋梁概要を表-1に示す。なお、下津井瀬戸大橋の側径間部にあるRC橋梁部については、別途耐震照査、補強設計を行っており、今回の照査、補強対象としてない。

これら3橋に適用された耐震基準は、表-1に示す本四耐震基準²⁾であり、この基準では、現在の道示耐震設計編³⁾に規定されているレベル2タイプⅡ相当の地震が考慮されていない。一方で、対象の吊橋3橋は一般に耐震性能は高いとされている長周期構造物であるが、ある程度の補強が必要となることは予想された。当該橋梁を含めた瀬戸大橋の耐震性能照査、補強設計の基本方針は、参考文献4)、5)を参照されたい。

3. 耐震性能照査

3.1 入力地震動

瀬戸大橋の耐震設計に用いた大規模地震動の概略⁴⁾は以下のとおりである。大規模地震動は、瀬戸大橋架橋地点の地盤構造、近隣の断層等を考慮した断層モデルにより求め、工学的基盤 $V_s=2.5\text{km/s}$ 、 1.5km/s で定義したもので

ある。地震動の種類は東南海・南海地震1波、中央構造線(鳴門-石鎚断層)1波、及び伏在断層4波(逆断層2波、横ずれ断層2波)の計6波である。解析に用いる入力地震動は、先に定義されている大規模地震動に対し、構造物と地盤の動的相互作用の影響を考慮するため地盤-基礎構造物を反映した二次元FEMモデルを用い、橋軸方向と橋軸直角方向で算出した。耐震性能照査、補強設計に用いた入力地震動のうち、代表としてBB4A基礎底面位置の地震動を図-2に示す。図-2には、北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋の主塔、補剛桁の1次モードの固有周期を合わせて示す。

対象の3橋は、道示¹⁾の適用範囲である支間長200mを大幅に超える長大橋であり、地震動の3次元的な挙動を考慮するため、水平2方向と鉛直方向も含めて3方向同時入力を基本とした。伏在断層を想定した地震波は橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ独立して入力し、2波平均で照査を行った。

3.2 列車荷重

道路鉄道併用橋である瀬戸大橋の耐震補強設計は、列車荷重を考慮することとしており、その荷重は、以下のとおりである。

標準列車荷重: EA-17 列車荷重強度: 35kN/m
慣性力の上限值: 線路方向 $0.2g$ 、線路直角方向 $0.3g$
載荷長: 全橋載荷
載荷する線路本数: 1線(単線) 載荷

列車荷重の載荷位置については、下り線載荷とした。

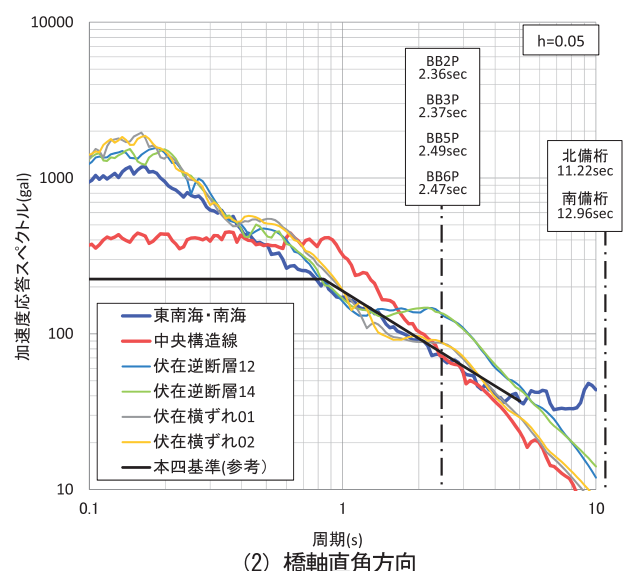
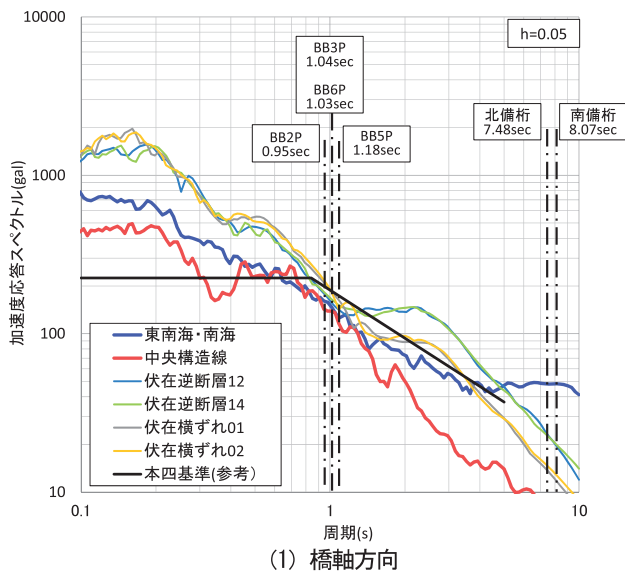


図-2 入力地震動 (BB4A 基礎底面位置)

Fig.2 Input seismic motions

表-2 減衰定数

Table 2 Damping constant

分類	部位	モデル化	材料	減衰
主塔	柱部・水平材	ファイバー要素	非線形	0.01
主構	上下弦材・斜材・垂直材	ファイバー要素	非線形	0.01
主横トラス	上下弦材・ブラケット等	ファイバー要素	非線形	0.01
横構	上下横構	ファイバー要素	非線形	0.01
床組	道路桁・鉄道桁・緩衝桁	線形はり要素	線形	0.02
	道路桁支承・鉄道桁支承	線形バネ要素	線形	0
変位制限	ウインドサ	バネ要素	線形	0
	エンドストッパー	衝突ばね	非線形	0
ケーブル	主ケーブル、ハンガー、センタースティ	非線形はり要素	線形	0.01
アンカレイジ	躯体	剛体	線形	0
	スプレースドル	線形バネ要素	線形	0
地盤・基礎系	ケーソン基礎・直接基礎	ウインクラーモデル	非線形	0.1

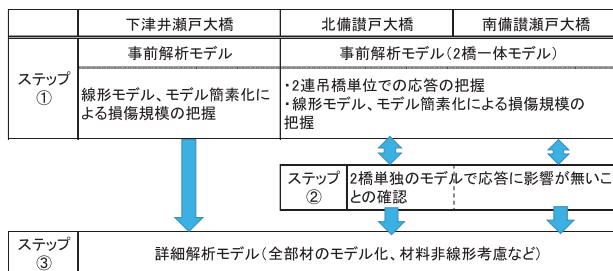


図-3 解析手順

Fig.3 Study flow

3.3 解析手順

耐震性能照査に用いた解析モデルは、地震時の挙動を正確に再現することを目指し、管理路を除く全トラス部材のモデル化を行うものとした。一方で、長大吊橋で補剛桁がトラス形式のため部材数が膨大となることから、耐震照査は、図-3に示すとおりステップ①の事前解析モデルによる照査の後、ステップ③の詳細解析モデルによる照査・検討の2段階で行った。ステップ①は、当初の照査、耐震補強検討から精緻な解析モデルを作成するだけでなく線形モデルの採用、部材の簡素化による事前解析モデルにより、モデル化の妥当性の確認を含め、損傷規模を把握するものである。ステップ③の詳細解析モデルは、ステップ①で、重量だけ考慮していた道路桁、鉄道桁など、全部材をモデル化し、各部材の詳細な挙動を把握するものである。

また南北備讃瀬戸大橋の2橋は、BB4Aアンカレイジを共有しておりステップ②において2橋単独の橋梁モデルと2橋を結合したモデルで振動特性等を比較した結果、地震応答に殆ど差が無く2橋単独で解析を行っても問題ないことを確認した。これにより耐震性能照査及び補強設計の解析モデルは、2橋の個別の単独モデルで解析す

るものとした。

なお、解析モデルの作成にあたっては、第一次完成形状（現在供用中の形状：道路4車線＋在来線2軌道）とした。本報告では、最終的なステップ③の詳細解析モデル及びその解析結果を中心に報告を行う。

3.4 解析モデル

(1) 主塔、補剛桁

図-4に北備讃瀬戸大橋の詳細解析モデルの例を示す。主塔、補剛桁は部材の塑性化が想定されると共に、特に主塔では大きな軸力変動及び2軸曲げを受けることから、これらの影響を考慮できるファイバーモデルを用いた。材料構成則は2次勾配がE/100のバイリニアモデル（移動硬化則）とした。ここに、局部座屈強度が全強でない構成板要素については圧縮側降伏応力度を局部座屈強度にした非対称バイリニアモデルを採用した。

補剛桁トラス部材端部の結合条件については、剛結合とした。これは、ピン結合とすると部材端部の断面変化位置の2次応力を評価できないこと、部材端部の断面変化をモデル化するため、ピン結合よりも剛結合としたほうが実際の挙動に近くなると考えられることなどからで

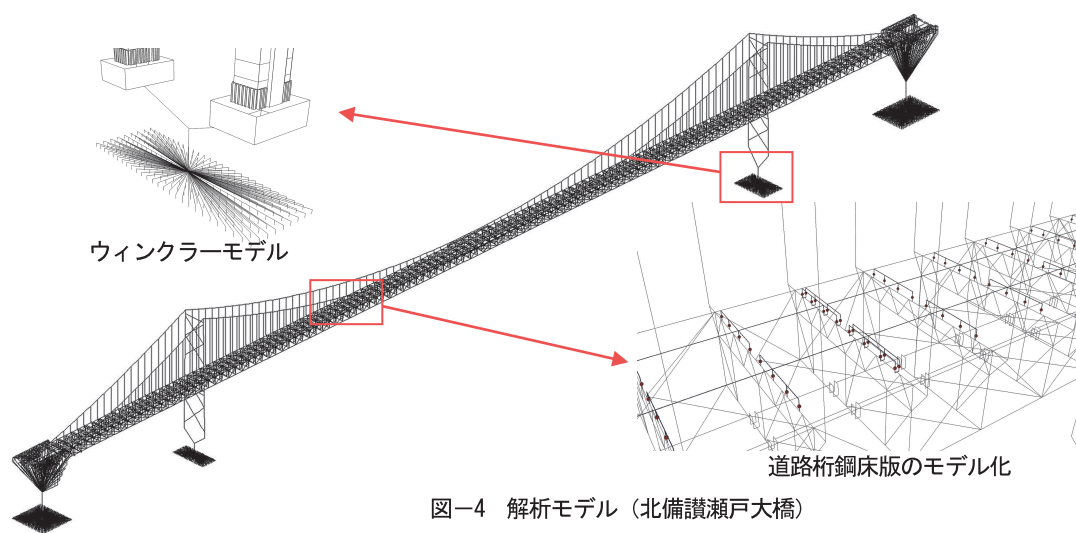


図-4 解析モデル（北備讃瀬戸大橋）

Fig.4 Analytical model

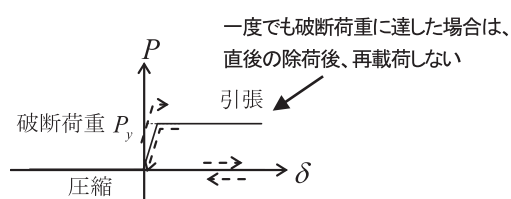


図-5 センターステイのモデル化

Fig.5 Analytical model of center-stay

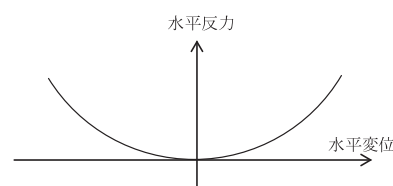


図-6 リンクの復元力特性

Fig.6 Force vs. displacement property of link

ある。また、補剛桁の格点間要素分割は、曲げの影響が考慮できるように部材軸方向に平均して格点間で4分割した。

道路桁を構成する鋼床版については、道路桁を上り線、下り線でそれぞれ1本の梁要素とし、全道路桁支承をモデル化して、道路桁の挙動を再現するものとした。

(2) 主ケーブル、ハンガーロープ、センターステイ

主ケーブル、ハンガーロープはケーブル特性が表現できる幾何学的非線形梁要素でモデル化した。このモデル化により、圧縮力が作用したときにケーブルがたわむことになり、結果的に非圧縮部材のような特性となる。この幾何学的変形によるケーブル挙動が実現象に近いと考えた。主ケーブルは、格点間を3分割、ハンガーロープは長さにかかわらず8分割し、振動モードが表現できるようにした。

ステイロープについては、ロッドの破断を考慮するとともに、ロープの非圧縮性を取り込んだモデル化を行った。図-5にセンターステイのモデル化を示す。

(3) タワーリンク、エンドリンク

等価なバネでモデル化するのではなく、両端ピンのトラス部材としてモデル化した。幾何学的非線形性を考慮した解析を行うため、図-6に示すような水平の相対変位と反力の関係を定義した⁹⁾。

(4) ウィンド杓、エンドストッパー

ウィンド杓は補剛トラス桁の直角方向の変形を拘束するように拘束条件を与え、押込み側のみ抵抗し、離れる

方には抵抗しない非線形バネでモデル化した。エンドストッパーは補剛桁-アンカレイジの遊間を考慮した衝突ばね要素でモデル化を行った。

(5) 基礎-地盤系

基礎の滑動・浮上りの発生も想定されたことから、それら影響を考慮できるように、基礎底面の鉛直方向と水平方向に非線形地盤バネを分散して配置したモデル（ウィンクラーモデル）を用いた。また対象とした全ての基礎において、基礎の底面積に比べて根入れが浅いため根入れを無視し、ウィンクラーバネは基礎底面に配置した。

(6) 減衰モデル

部材レベルで個別に減衰を設定できる部材別剛性比例型減衰を採用した。また、振動モードに対応する減衰定数算出時の等価減衰定数は道示耐震設計編³⁾を参考に、表-2のとおりとした。剛性差の大きい箇所（支承周りなど）に部材別減衰を設定すると飛び移り現象⁶⁾が発生する恐れがあるため、減衰は考慮していない。また、剛体振動（高周波数帯域）が生じる可能性があるが、それ自体に減衰を期待できない支承やリンク取り付け部などの仮要素に対しては減衰を考慮しないものとした。

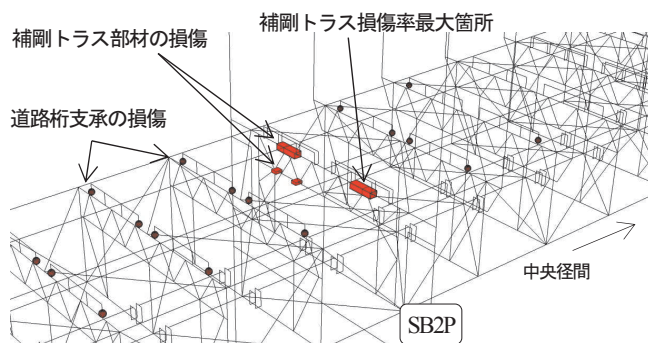
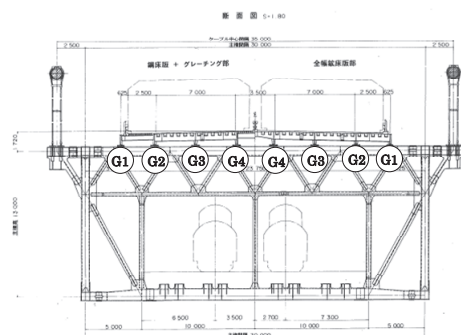
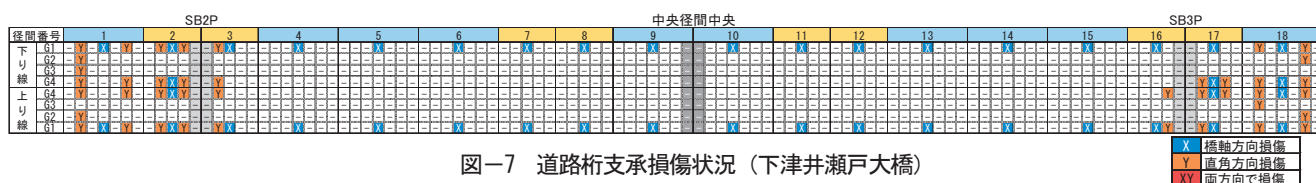
(7) 解析手法

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

表-3 耐震性能照査結果総括表
Table 3 Summary of seismic performance verification

構造	構造要素	照査項目	照査結果		
			下津井瀬戸大橋	北備讃瀬戸大橋	南備讃瀬戸大橋
上部構造	補剛トラス	安定照査	0.995 安定	0.90 安定	0.99 安定
		降伏照査	1.99 主横トラス10箇所降伏	0.80 降伏しない	0.97 降伏しない
	主塔	安定照査	0.93 安定	0.75 安定	0.85 安定
		降伏照査	0.55 降伏しない	0.50 降伏しない	0.56 降伏しない
		(水平材)せん断照査	0.10 降伏しない	0.08 降伏しない	0.10 降伏しない
		(基部アンカー部)	0.08 降伏しない	0.09 降伏しない	0.08 降伏しない
	リンク	タワーリンク	0.48 耐力OK	0.28 耐力OK	0.30 耐力OK
		エンドリンク	0.41 耐力OK	0.29 耐力OK	0.38 耐力OK
	ウィンドサ	タワー	0.38 耐力・移動量OK	0.44 耐力・移動量OK	0.59 耐力・移動量OK
		アンカレイジ	0.44 耐力・移動量OK	0.39 耐力・移動量OK	0.45 耐力・移動量OK
	サドル	滑り照査	0.41 滑らない(安全率2)	0.72 滑らない(安全率2)	0.59 滑らない(安全率2)
	エンドストッパー	遊間量照査	0.29 衝突しない	0.30 衝突しない	0.37 衝突しない
	道路桁支承	変位照査	0.64 (0基 / 880基)	0.51 (0基 / 1088基)	0.82 (0基 / 1160基)
		耐力照査	2.36 (83基 / 880基)	3.49 (90基 / 1088基)	4.88 (153基 / 1160基)
	センターステイ	破断照査	全破断 (12本 / 12本)	全破断 (12本 / 12本)	全破断 (12本 / 12本)
下部構造	安定照査 (基礎底面浮上り、鉛直支持)		浮上り面積率44% (許容値60%以下) 最大押込み力が極限支持力以下	浮上り面積率47% (許容値60%以下) 最大押込み力が極限支持力以下	浮上り面積率49% (許容値60%以下) 最大押込み力が極限支持力以下
		部材照査 (各ケーソン頂版照査)	SB2P,SB3P照査OK	BB2P,BB3P照査OK	BB5P,BB6P照査OK
	主ケーブル	ケーブル降伏照査	0.40 耐力OK	0.44 耐力OK	0.40 耐力OK
	ハンガー		0.29 耐力OK	0.33 耐力OK	0.33 耐力OK

値は照査値(応答値/許容値)の最大値で、損傷度(1を超過するとNG)を表す



3.5 耐震照査

鋼部材の照査方法は、ファイバー要素のひずみによる照査と道示鋼橋編⁷⁾の軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の安定照査式を併用した。また、タワーリンク、支承などは、それらを構成する部材の中で最も低い降伏応力相当の耐力及び移動可能量で照査した。

表-3に3橋の耐震照査結果を示す。3橋とも全般に損傷箇所は少ない結果となった。特に主塔、補剛桁の主要な部材には大きな損傷は見られなかった。これは、対象

橋梁が長周期構造物であり、特に補剛桁などの主要な振動モードの固有周期帯では、今回設計に用いた地震力が建設時の地震力と大差ないことによるものと考えられる。

3橋に共通する損傷部位は、センターステイ及び道路桁支承となっている。このうち、センターステイは、3橋とも建設時の設計から地震時に破断が想定されていること、また今回のセンターステイの破断を考慮した地震応答解析を行った結果、補剛桁が橋軸方向変位により、エンドストッパーに衝突しないことが確認できたことか

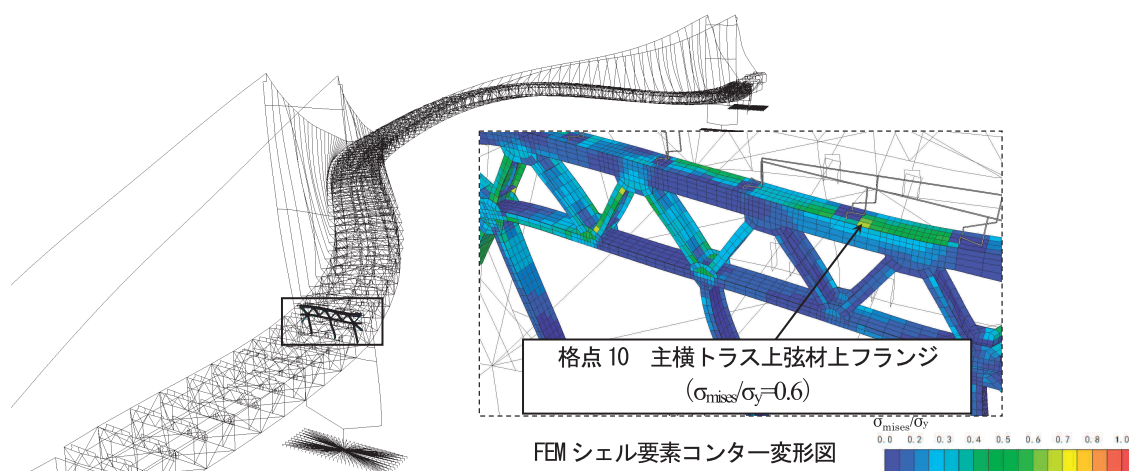


図-10 主横トラス上弦材の最大損傷発生時刻の変形図（下津井瀬戸大橋、東南海・南海地震、変形倍率 100 倍）

Fig.10 Stiffening girder deformation when the maximum stress in the upper-chord of floor truss occurs.

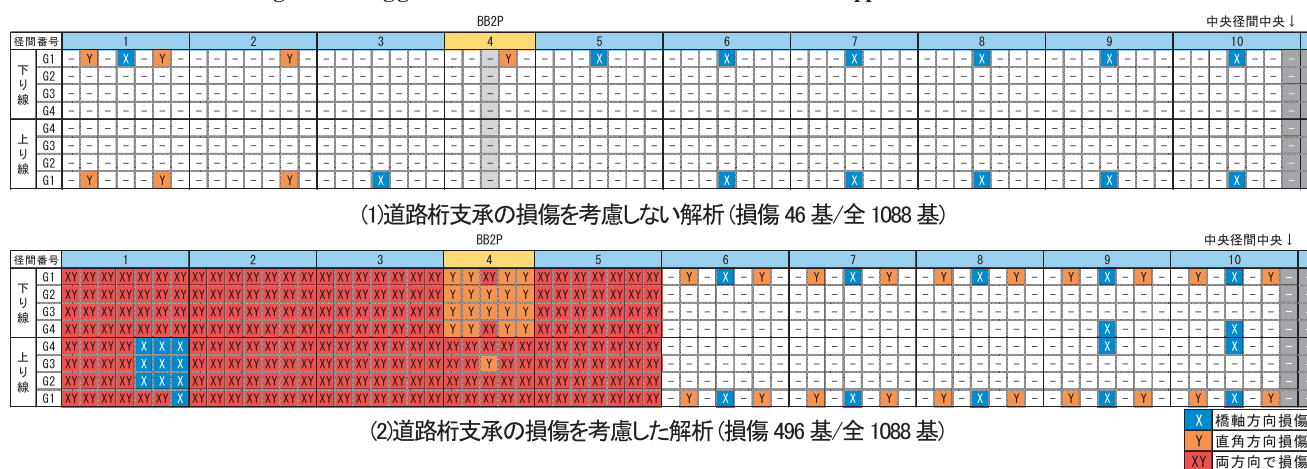


図-11 道路桁支承損傷考慮の有無による解析結果の違い（北備瀬戸大橋、BB1A～中央径間中央までの表記）

Fig.11 Difference of seismic performance results due to analytical condition of bearing

ら、センタースティの破断は許容するものとした。

道路桁支承（BPB 支承）は、主に6径間の上下線分離の鋼床版を支持し、片側1支承線あたり4基設置されている。そのうち道路桁両外側（G1桁、図-8）と中央分離帯側（G4桁）の支承が多く損傷する結果となった（図-7）。いずれも、補剛桁の変形に追従できないための損傷でなく、地震慣性力に対する支承の耐力不足である。特にG1桁支承は、オープングレーチングを支持するものの、活荷重が直接載荷されないため、支承反力別のタイプ分けでG2-G4桁支承に比べ小さく、結果、支承耐力が小さいため、損傷が集中したものと推定される。

また、表-3には示していないアンカレイジ上屋部については、3橋ともに上屋道路桁の橋脚、上屋鉄骨などに損傷が生じることは無かった。

下津井瀬戸大橋の補剛トラス部材の損傷は、端支点付近と中間支点の主横トラス上弦材、中弦材の構成板要素の一部の塑性化である（ひずみレベルで最大1.99 ϵ_y 程度）。図-9にSB2P主塔近傍のトラス部材の損傷部位を示す。これらの損傷は補剛桁の橋軸直角方向の変形によるものであり、損傷の程度を以下の方法により評価した。

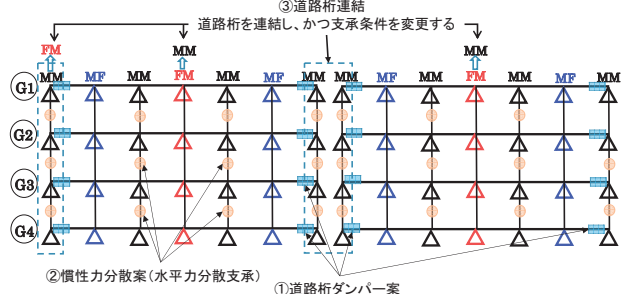
塑性化する主横トラスの上弦材と中弦材は、橋軸直角

方向に対する地震時においても部材に作用する軸力が小さく（0.14 N_y 程度、 N_y ：全断面降伏軸力）、地震時に局所的に降伏ひずみを若干超過する応答レベルは、構造安全性の観点から耐力力の低下につながる損傷に至ることはないと考えられる。また、検討に使用している補剛トラス部のファイバーモデルは、ガセット部及び格点結合部の剛域は考慮していない。一方、部材端部のガセットを介して伝達される力の流れを評価するため、図-10に示すように最大損傷が生じている横トラスに対して、部材格点部のガセットを含めた精緻なFEMシェル要素に置き換えた後、それを橋梁全体系に組み込み動的応答解析を行った。その結果、同一格点位置において、降伏に対する超過率を比較すると、FEMシェル要素ではミーゼス応力で0.6 σ_y 程度であり、塑性化する箇所は無かった。また、ガセットに損傷は見られなかった。

以上から、低軸力部材に対して、地震時に局所的に若干の降伏ひずみを超過する応答レベルでは、構造安全性の観点で耐力力の低下につながる損傷には至ることはないと考えられ、また地震後の使用性（供用性や修復性）の観点で橋の機能に影響を及ぼす応答レベルではないと判断できることから、部材補強は行わないものとした。

表－4 道路桁支承への耐震対策案と評価

Table 4 Seismic retrofit measures for bearing

対策案	①道路桁ダンパー設置案	②慣性力分散案	③道路桁連結案	④センターステイダンパー設置案
概要	- 橋軸方向の可動支承部に制震ダンパーを設置し、橋軸方向の地震時慣性力を多点で分担し、支承損傷箇所数の低減を図る案。 - 橋軸方向にのみ有効な対策案。	- 可動支承部(支線)の各支線間に、水平力分散支承を設置し、地震時に道路桁支承に作用する水平力を分散し、道路桁支承損傷箇所を低減。 - 橋軸方向、橋軸直角方向の両方向に機能する案。	道路桁を連結することで振動単位をまとめ、かつ支承条件を変更(固定→可動)し、地震時水平力を任意の支承に集中させ、道路桁支承損傷箇所を集約させる案。	制震ダンパーをセンターステイ位置に設置し、支承に近い位置で、制震ダンパーによる減衰と振動特性の変化により、支承の損傷数低減を期待する案。
評価	道路桁と補剛トラスの相対変位が30mm程度と小さいため、ダンパーの効果も小さい。 ×	道路桁と補剛トラスの相対変位が30mm程度と小さいため、水平支承による水平力分担効果も小さい。 × ・損傷無しの支承部にも手を加えるなど必要な対策箇所が多い ・対策の施工規模、難易度が高い	道路桁連結方法に対する構造詳細検討が必要。 ×	支承損傷はセンターステイ破断前に生じており、ダンパーを機能させるには、センターステイを取り外し、ダンパーを設置する必要がある。 ・常時において、制震ダンパーはセンターステイの機能を代替できない。 ×
対策案	⑤補剛桁ダンパー設置案	⑥G1桁固定支承補強案		
概要	補剛桁-橋台、主塔間に制震ダンパーを設置し、制震ダンパーによる減衰と振動抑制・振動特性の変化により、道路桁支承の損傷数低減を期待する案。	- 道路桁支承の中で、損傷数も多いG1桁支承の直接補強する案。 - 補強後のG1桁支承剛性の変更により、G4桁支承の損傷低減を期待。	 ③道路桁連結 道路桁を連結し、かつ支承条件を変更する ②慣性力分散案(水平力分散支承) ①道路桁ダンパー案	
評価	- ダンパーの設置により、支承部に作用する荷重が変化し、逆に支承の損傷数が増加する結果となり、損傷数低減には効果がなかった。 - 橋台部および主塔部への設置位置の検討を行った結果、設置は困難。また、バックアップトラス等の大規模な補強が必要。 ×	対策として、「G4桁固定支承補強案」との経済性比較も行い、足場費用の負担が小さく経済性に優れている、本案を最終的に採用。 ○		

4. 耐震補強設計

4.1 耐震対策の比較検討

前章で述べたとおり、下津井瀬戸大橋の補剛トラスの一部損傷は許容するものとし、また対象3橋ともセンターステイの破断も許容するため、補強対象箇所は、道路桁支承のみとなる。

道路桁支承についても、損傷を許容することができないか検討を行った。道路桁支承の損傷については、支承の損傷を許容することを想定し、ある支承の損傷が隣接の支承の損傷へ連鎖していくことを考慮したモデルと、支承の損傷を許容しないことを前提に、支承が補強されているとして当該支承の地震力は当該支承で分担するモデル(耐震性能照査で用いるモデルと同一)による解析結果の比較により、支承部を補強するものとした。図－11に北備瀬戸大橋の東南海・南海地震時、支承損傷考慮の有無による損傷箇所の違いを示す。図－11のとおり、支承損傷を考慮した場合、当該支承へ作用していた地震力が他の支承へ移り、損傷箇所が多数となる。この状況は、損傷支承数に差はあるものの、他の2橋も同様であった。そのため、支承補強を行ったほうが、地震後の使用性、復旧性などの観点から有利であると判断した。

支承補強を行う場合、補強対象となる支承が多いため、支承部を直接補強しない、または補強箇所を低減させる方法の検討を行った。表－4に、主に道路桁支承へ作用する地震力を低減させることを目的とした、考えられる各種対策案とその評価を示す。対策案のうち、対策自体の施工難易度が高く、また補強不要な支承への対策が必要となる案(①、②、③案)、対策の有効性が認められ

ない案(案④、⑤)は除外され、最終的に案⑥の支承部へ直接補強を行う対策を選定した。この場合、損傷が多く生じるG1、G4桁支承のうち、G4桁支承位置は、鉄道営業線上空であり(写真－1参照)、対策工において足場工の占める割合が大きい。そのため、まずG1桁支承に対して補強を行う。この補強によりG1桁支承部の支承剛性が高まる効果を解析モデルに反映し、その構造系で再度解析を行い、その結果損傷が残るG4桁支承に対しても補強を行うものとした。

4.2 耐震補強設計

耐震補強設計では、補強量、補強構造の設定にあたり支承を構成する部材の最小耐力(最初に損傷する部位)及び次点、次々点の耐力を算出し、支承応答値と支承耐力を比較して設計を行った。支承応答値が最小耐力を超過するが、次点耐力以下の場合(耐力超過量が小さい場合)は、補強構造として、不足する支承耐力に対する補強とした。一方で、支承の応答値が、支承の次点耐力を超過する場合(耐力超過量大きい場合)は、既設支承自体の耐力は期待せず、支承応答値に対して補強部材を設計するものとした。

橋軸方向の補強構造部を図－12に示す。耐力超過量大きい場合は、道路桁からのブラケットにより主横トラス上弦材に反力を取る構造とした。橋軸直角方向の補強構造を図－13に示すが、補強の考え方は基本的に橋軸方向と同様であるが、構造形式は耐力超過量の大小に係わらず、下沓突起部に接する構造物を主横トラス上弦材上に設置する構造とした。

G1桁支承を補強する場合、道路桁重量の地震時慣性

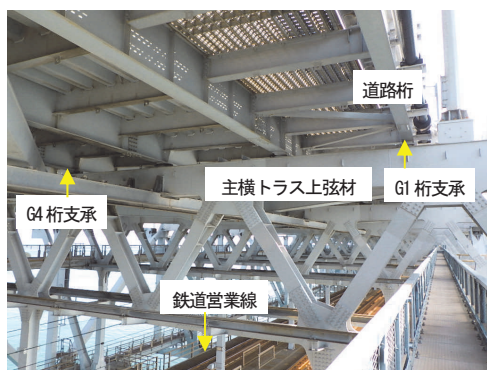


写真-1 道路桁支承の配置
Photo 1 Location of bearings

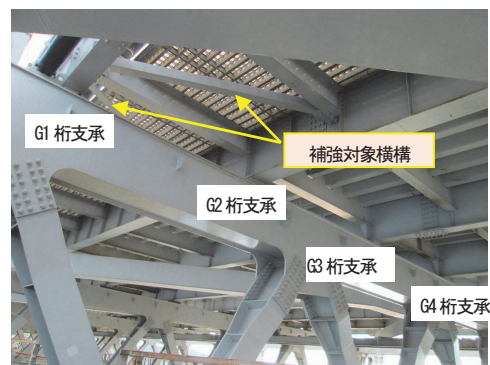


写真-2 補強対象横構
Photo 2 Lateral bracings to be retrofitted

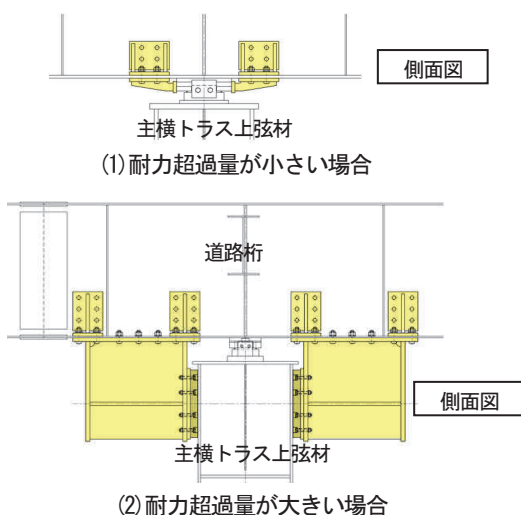


図-12 補強構造図 (橋軸方向)

Fig.12 Seismic retrofit for bearing (longitudinal direction)

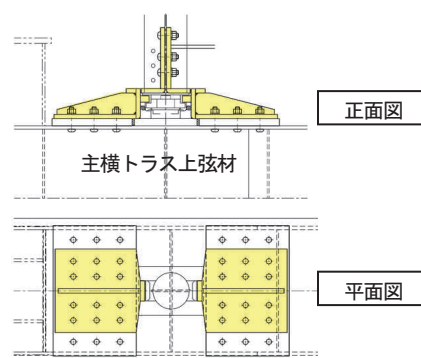


図-13 補強構造図 (橋軸直角方向)

Fig.13 Seismic retrofit for bearing (transverse direction)

力がG1桁の橋軸もしくは橋軸直角方向の固定支承に集中する。この場合、G1桁とG2-G4桁に変位のずれが生じることが必要となる。現況構造で、G1-G2桁の支承位置には横構が設置されており（写真-2参照）、G1桁支承に補強を行うと、現況の設計値以上の軸力が横構部材に作用することとなるため、本横構も軸力照査を行い、部材補強を行うこととした。

5. おわりに

瀬戸大橋の吊橋3橋の耐震性能照査、補強設計について報告した。3橋とも道路桁支承に補強が必要なものの、全体的に損傷は軽微であった。また、はじめに述べたとおり対象3橋の工事発注が平成28年末になされたことにより、今後は、残る与島高架橋などの補強設計を進めるとともに、補強工事における設計的なバックアップを着実に行って行きたい。

謝辞

本耐震性能照査、補強設計の実施に際しては本四耐震補強検討委員会(委員長:家村浩和京都大学大学院名誉教

授)にてご検討頂き貴重なご意見を頂いた。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編、2012.3
- 2) 本州四国連絡橋公団：耐震設計基準・同解説、1977.3
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、2012.3
- 4) 福永勸、竹口昌弘、遠藤和男：耐震性能評価用大規模地震動の設定（瀬戸大橋）、本四技報、Vol.35、No.115、pp37-38、2010.9
- 5) 福永勸、角和夫、遠藤和男：瀬戸大橋の耐震補強検討、本四技報、Vol.36、No.117、pp36-37、2011.9
- 6) 吉川博、並川賢治、溝口孝夫、山口宏樹、矢部正明：短リンクを有する斜張橋の複合非線形地震応答解析に現れる飛び移り現象とその解決、土木学会地震工学論文集、2003.6
- 7) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編、pp.176-181、2012.3

瀬戸大橋管理路の劣化度評価及び補修方法に関する検討

A Study on Deterioration Grading and Repair Method of Maintenance Ways at Seto-Ohashi Bridges

安部 真理子 Mariko Abe

坂出管理センター
橋梁維持第一課

門田 整達 Yoshikatsu Kadota

坂出管理センター
橋梁維持第一課長代理

遠藤 和男 Kazuo Endo

坂出管理センター
橋梁維持第一課長

概 要

瀬戸大橋は供用後28年が経過し、亜鉛めっき部材の劣化が顕著となっている。特に補剛桁部に設置された管理路は瀬戸大橋全体で延長約14.8kmと膨大な数となるため、計画的かつ合理的に補修を進めていく必要がある。耐久性、施工性及び経済性に優れた補修方法に関する検討として実施した試験塗装では、塗装工数又は経済性のいずれかが現仕様よりも優位となる補修塗装仕様が確認できたため、継続的な追跡調査を実施することとした。また、劣化度の再評価として実施した顕微鏡観察では、手摺において劣化の進行が確認出来たため、補修方法を再塗装から再めっきに変更した。さらに、定量的な劣化度評価手法として、画像解析による劣化度自動判別の有効性を確認した。

Deterioration of galvanized members at the Seto-Ohashi Bridges is getting serious 28 years after the opening of the Bridges. Especially, the maintenance ways necessitate repair works in a reasonable and planned manner because of its massive volume, 14.8 km in total length. Experimental coating tests revealed that some paint systems were superior in durability, workability and cost compared with current one and, therefore, further follow-up of them was necessary. Since progress of deterioration at the hand rail was found by microscopic observation, its repair method was changed from re-coating to re-galvanization. Also, effectiveness of image analysis as a quantitative deterioration grading method was confirmed.

1. はじめに

瀬戸大橋では、自動車防護柵、グレーチング、管理路等の橋梁附属物の多くの防食方法として溶融亜鉛めっきが採用されているが、経年による変状の発生、進展が顕著となっている。また、一般的に海峡部橋梁では点検や補修を行う上での近接手段は限られており、管理路の重要度は極めて高いと言える¹⁾。このため、平成 20 年度に実施した外観目視による劣化度評価に基づき、平成 24 年度より瀬戸大橋管理路の補修を開始した。

瀬戸大橋管理路の総延長は約 14.8km と膨大であり、計画的かつ合理的に補修を進めていくには、劣化度の評価を適切に行い、補修箇所の優先度を決定するとともに、耐久性、施工性及び経済性に優れた補修方法を選定することが重要となる。また、その補修には長期を要することから、計画策定時から劣化が進行するため、随時、劣化度の再評価を行うことが必要となる。

このような背景から、平成 23、24 年度には、より耐久性、施工性及び経済性に優れた補修方法を確立することを目的に、10 種類の試験塗装を行い、その後に追跡調

査を行った。

また、平成 27 年度には、部分的に部材を切り出して顕微鏡観察による劣化度の再評価を行い、当初の評価に基づく補修方法の妥当性の確認を行った。

さらに、外観目視によらない、より定量的な劣化度評価を行うことを目的に、画像解析による劣化度自動判別手法の有効性の検証を実施した。

本文では、瀬戸大橋管理路におけるこれまでの補修状況、試験塗装とその追跡調査結果、劣化度再評価と補修方法・計画の見直し及び画像解析による新たな劣化度評価方法について述べる。

2. これまでの管理路補修状況

2.1 当初の劣化度評価

瀬戸大橋は、補剛桁の東西に管理路が設置されており、平成20年度に実施した外観目視による劣化度評価では、主横トラスの格点間を1パネルとした東西の全パネル(東西計1,118パネル)の管理路を写真撮影し、これらの画像の色相を基に、パネルごとに劣化度の目視評価を行った。

補剛桁における管理路設置位置を図-1に示す。色相による判断基準は、既往文献²⁾における溶融亜鉛めっきの劣化度評価基準(表-1)を参考とし、劣化度Ⅰ～Ⅴの写真見本を作成した。写真-1に劣化度Ⅲ及びⅣの写真見本例を示す。図-2は、この手法に基づき実施した劣化度評価結果である。これより、劣化度Ⅲ～Ⅴが占める割合は南備讃瀬戸大橋96%、与島橋85%の順で多く、瀬戸大橋全体では80%と高い比率で劣化が進行していたことがわかった。

2.2 当初の補修方法・計画

瀬戸大橋の管理路を構成する部材は、図-3に示す様に、主桁、手摺、グレーチング、エキスパンドメタルがある。当初選定した補修方法の区分を表-2に示す。管理路主桁及び手摺は一時撤去が困難なため塗装による補修を行い、グレーチング及びエキスパンドメタルは一時撤去が容易であり、補修塗装が構造上現実的でないため、再めっきによる補修とした。補修塗装仕様には、当社で

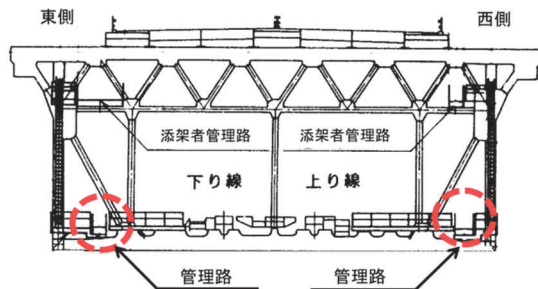


図-1 管理路設置位置(南備讃瀬戸大橋)
Fig.1 Location of Maintenance Way (Minami Bisan-Seto Bridge)

表-1 劣化度評価基準

Table 1 Deterioration Grade

状態	劣化度
亜鉛層が残っている場合	Ⅰ
亜鉛層の劣化が進み、合金層が局部的に露出した場合	Ⅱ
亜鉛層が消耗し、合金層が全面的に露出した状態	Ⅲ
合金層の劣化が素地付近まで進んだ状態	Ⅳ
めっき被膜が消耗し、劣化が鉄素地に至っている状態	Ⅴ



写真-1 写真見本(左：劣化度Ⅲ、右：劣化度Ⅳ)

Photo 1 Photo Example of Deterioration (Left: Grade III, Right: Grade V)

規定した劣化溶融亜鉛めっき面への補修塗装仕様であるWH仕様を採用した(表-3)。また、再めっきには、腐食環境の厳しい箇所であることを考慮し、溶融亜鉛めっきよりも耐候性に優れているとされる溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっきを用いることとした。補修計画は、平成20年度の劣化度評価結果を基に劣化度Ⅳ及びⅤの割合が多い橋梁から優先的に補修するものとした。補修開始に先立ち、平成23年度には次節で述べる試

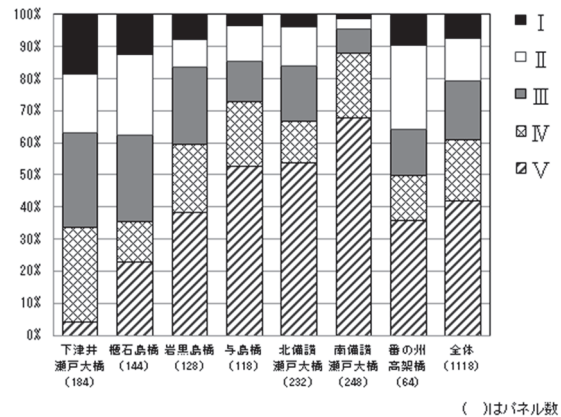


図-2 劣化度評価結果(平成20年度)
Fig.2 Deterioration Grading Result in 2008

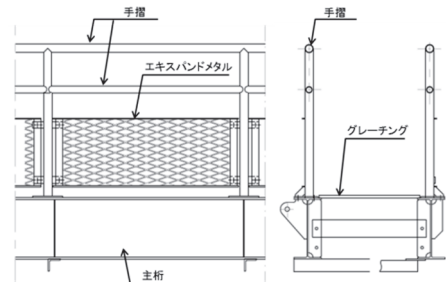


図-3 管理路の構造
Fig.3 Inspection Way

表-2 当初補修区分

Table 2 Original Repair Method

部材名	補修仕様	一時撤去の難易度
主桁	補修塗装	重量構造物であり、撤去・設置は現実的ではない。また、主桁には添架管が敷設されており、これらを一部板受けしながらの施工は困難である。
手摺	補修塗装	HTBにより固定されており、撤去・設置に手間がかかる。
グレーチング・エキスパンドメタル	再めっき	構造が複雑でケレンできない。他の部材より比較的取り外しが容易である。

表-3 劣化亜鉛めっき面用補修塗装仕様(WH仕様)

Table 3 Repair Coating Specification

塗装系記号	素地調整	第1層	第2層	第3層
WH	3種	HBS K 5627 変性エポキシ樹脂塗料外面用 下塗 240(60)	HBS K 5627 変性エポキシ樹脂塗料外面用 下塗 240(60)	HBS K 5630 高耐久性 ふっ素樹脂塗料 上塗 120(25)

表中の数字は、はけ塗りでの塗料標準使用量(g/m²)を示す。()内の数字は使用量から換算した乾燥塗膜厚の標準値を示す。

験塗装を実施し、翌年の平成24年度から本格的な施工を開始した。施工量は年間おおむね70パネルで配分し、補修が全て完了するまでに15年を要する計画とした。施工は、劣化度評価に基づく優先度に加え、来客案内等の使用頻度を勘案して南・北備讃瀬戸大橋から着手し、平成27年度までに北備讃瀬戸大橋の東西管理路の補修を完了したところである。

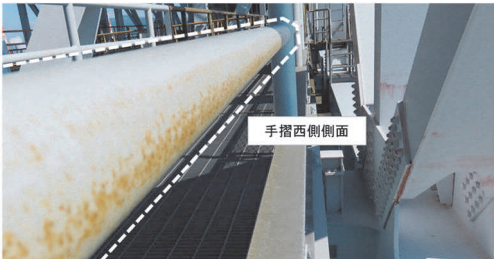
3. 試験塗装及び追跡調査結果

これまでの補修塗装で適用しているWH仕様は、素地調整でさび部を完全に除去する必要があるとともに、塗装工程が3層塗りとなることから、施工期間が長くなる欠点がある。また、この仕様は平成2年に規定された劣化亜鉛めっき面への補修塗装仕様であるW仕様の上塗りを高耐久性ふっ素樹脂塗料に変更したもので、近年では劣化亜鉛めっき面へ適用可能な新材料の開発が進められている。そこで、今後長期的な補修をするにあたり、より素地調整及び塗装工数の軽減ができ、かつ耐久性が優れた補修塗装仕様を検討することを目的に、実橋の管理路において試験塗装を実施した。試験塗装で使用する仕様は、WH仕様を基準とし、塗装工程、工費、長期耐久性等を考慮し、10種類の補修塗装仕様を選定した。試験塗装の実施位置は、南備讃瀬戸大橋の劣化度Vと判定されたパネルとし、同様な環境で比較するために、連続した10パネルを選定した。追跡調査は、塗装後2～3年経過時点での外観状況を評価することとし、さび、塗膜の異常、白亜化等に着目し、目視にて実施した。

各仕様の特徴及び追跡調査結果を表－4に示す。調査の結果、塗膜厚がWH仕様より薄い全ての仕様でさびが

発生しており、これらのさびは、西風がよくあたる手摺側面の西面で顕著にみられた(写真－2)。これに対し、WH仕様及びWH仕様より塗膜が厚いa-1、b及びd-2仕様は、外観に発せいは見られず、塗装面に光沢が残っていた。塗装工数及びコスト面に着目すると、b仕様は、2層塗りとなり工期を削減できる可能性があるが、費用が現仕様と比べて割高となる。a-1及びd-2仕様は、4層塗りとなり、塗装工数が増加する。g仕様は、現仕様と同じ塗装工数でコスト面で優位であるが、さび転換型であるため現時点では評価できなかった。

以上より、WH仕様と比較して塗装工数と経済性の両方に優位となる仕様は確認できないものの、いずれかが優位となる仕様があることがわかった。しかし、これは経過年数が2～3年と浅い追跡調査に基づく評価であることから、引き続き、約5年ごとに外観に加え、塗膜消耗量や付着力の確認を実施し、長期的なデータを基に飛来塩分等の影響を受ける実橋での耐久性やLCCを評価して、適切な補修方法の選定を行う予定としている。なお、今回の追跡調査で既に発せいが確認されている仕様は、補修塗装仕様で採用する可能性は低いが、仮補修等の応急



写真－2 西面手摺発せい状況

Photo 2 Rust on Hand Rail

表－4 試験塗装の仕様及び追跡調査結果

Table 4 Follow-up Result of Experimental Coating

種別	仕 様	層数	総膜厚 (μm)	特徴	施工単価 [※]	試験塗装 施工年	経過年	管理路手摺の外観状況						外観目視による評価	
								側面(東面)	側面(西面)	上面	下面	支柱ボルト部	白亜化		
a	本四塗装仕様(WH仕様)	3層	145	変性エポキシ高耐久性 ふっ素	1.0	平成23年	3年	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	なし	塗装面は光沢あり。	○
a-1	本四塗装仕様 改良型	4層	175	本四塗装仕様にエポキシ 樹脂塗料中塗を1層追加	1.2	平成23年	3年	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	なし	塗装面は光沢あり。	○
b	超厚膜型エポキシ樹脂塗料	2層	400	合金層に対する高度な密着、 超長期耐久性、低飛散効果、 低VOC化で環境に配慮	1.5	平成23年	3年	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	なし	塗膜の不陸が多く見た目は悪いが、 特に変化はない。	○
c-1	無溶剤、無機質塗料	1層	54	環境に優しいさび止め、上 塗り兼用の無機質・無溶 剤コーティング材	0.8	平成23年	3年	変化なし	さび	変化なし	変化なし	さび	なし	手摺側面(西面)は全体的にさびが多く 発生している。	×
d-1	厚膜形無機系ポリシロキサン塗料	2層	125	ふっ素樹脂塗料を上回る 超耐摩性塗料	0.9	平成23年	3年	変化なし	さび	変化なし	変化なし	さび 塗膜剥れ	なし	手摺側面(西面)は全体的にさびが多く 発生している。	×
c-2	無溶剤、無機質塗料	1層	42	環境に優しいさび止め、上 塗り兼用の無機質・無溶 剤コーティング材	0.8	平成23年	3年	変化なし	さび	変化なし	変化なし	さび	なし	手摺側面(西面)は全体的にさびが多く 発生している。	×
d-2	厚膜形無機系ポリシロキサン塗料	4層	205	ふっ素樹脂塗料を上回る 超耐摩性塗料	0.9	平成24年	2年	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	変化なし	なし	塗装面は光沢あり。	○
e	さび安定化防錆塗料	3層	48	塗膜を鋼材表面に形成し 鋼材をさびから長期的に守 る防せい工法	1.0	平成24年	2年	変化なし	さび	変化なし	変化なし	変化なし	なし	手摺側面(西面)は特にさびが多く発生 している。一部支柱ベースプレートに塗膜 の剥れがある。	×
f	無機系無溶剤封孔剤	2層	135	ふっ素樹脂塗料以上に素 外壁に強い無機系ポリ マー	1.0	平成24年	2年	変化なし	さび	変化なし	変化なし	変化なし	なし	手摺側面(西面)は特にさびが多く発生 している。	×
g	錆転換型防食塗装	3層	70	内部からさびを無力化する 防せい・防食処理システム	0.8	平成24年	2年	変化なし	さび	変化なし	変化なし	さび	なし	赤さびから黒さびに転換する塗料だが、 現時点では判別不可。確認したさ びは、塗装前の残存さび。	△

※施工単価はWH仕様での施工単価1.0とした場合。JB本四歩掛を使用、仮設費は含まない。

処置的な補修材として使用できる可能性があるため、これらの材料についても、追跡調査を継続することとする。

4. 劣化度再評価及び補修方法の見直し

4.1 劣化度再評価

溶融亜鉛めっきの組織は、図-4のように、主に純亜鉛層 η 層、合金層 ζ 層及び $\delta 1$ 層から成る。劣化亜鉛めっき面へ適用を前提とした補修塗装仕様(WH仕様)は、亜鉛による防食効果が期待できる ζ 層が残存している間に塗装を完了する必要がある。平成20年度に実施した当初の劣化度評価では、写真-3に示すように、劣化度Vと評価された管理路の一部で表面さびを除去したところ、亜鉛めっきの合金層と思われる灰色を呈していたことから、劣化度Vと判定された管理路でも劣化が鉄素地まで至っている部位はごくわずかと判断し、WH仕様による補修塗装を実施してきた。しかし、光学式顕微鏡による断面の詳細な確認はされておらず、劣化度Vと判定された管理路には、少なからずさび層を形成した部分を含むこと

が考えられる。また、仮に部分的に合金層が残った断面があつたとしても、その断面に対して鉄素地まで至っている範囲の多少によっては亜鉛による防せい効果が期待できない可能性や劣化度評価時点から補修までの間に劣化が進行している可能性も懸念された。当初の補修方法では、手摺は塗装による補修としたが、鉄素地に至っている状況があるなら、局部的であれば防せい面用の塗装仕様の適用を検討し、全面的であれば再めっきの適用を検討する必要がある。そこで、平成27年度に、当初の評価で劣化度Vと判定した実橋の管理路手摺を一部撤去し、めっき層の有無について部材断面の調査を実施した。試験体は、写真-4に示す4箇所の部材を切断し、その部材を8等分に切断した後、それぞれの試験片を光学式顕微鏡で撮影し断面観察を行った。

図-5及び写真-5～6に試験体No.2の観察結果及び断面画像を示す。写真-5では合金層である ζ 層及び $\delta 1$ 層が残っているが、写真-6ではさび層しか確認できなかった。顕微鏡の観察結果は、めっき層の消失及びさび層は、手摺の側面部に多く見られ、上面及び下面付近ではおおむね合金層が残存していたが、一部鉄素地まで至ってい

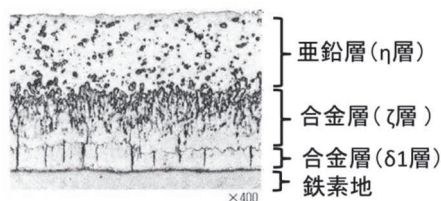


図-4 溶融亜鉛めっき層の顕微鏡写真²⁾
Fig.4 Microscopic Image of Galvanized Steel

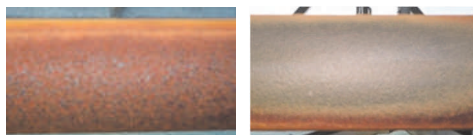


写真-3 付着さび除去前(左)及び除去後(右)の手摺
Photo 3 Hand Rail Before (Left) and After (Right) Rust Removal

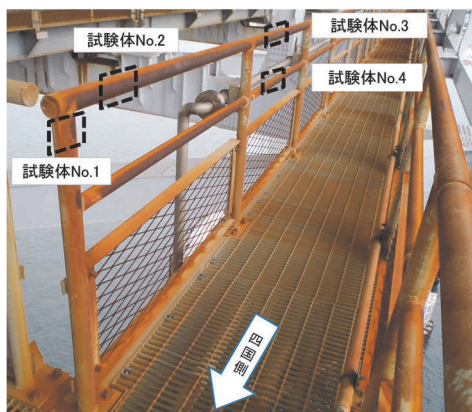


写真-4 断面確認位置(劣化度V手摺)
Photo 4 Re-evaluated Hand Rail (Grade V)

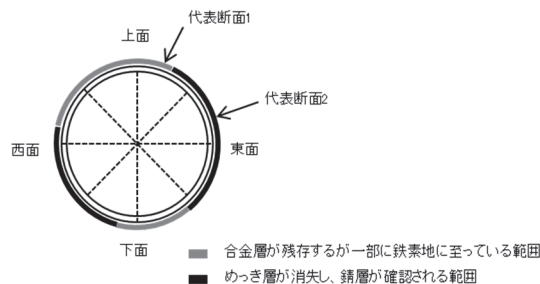


図-5 断面観察結果(試験体No. 2)
Fig.5 Re-evaluated Result

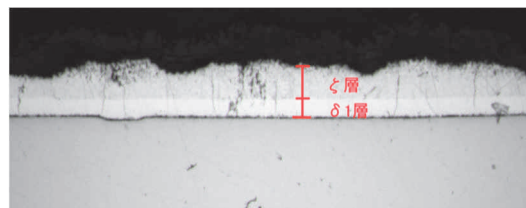


写真-5 代表断面 1(200 倍画像)
Photo 5 Microscopic Image (Section 1)

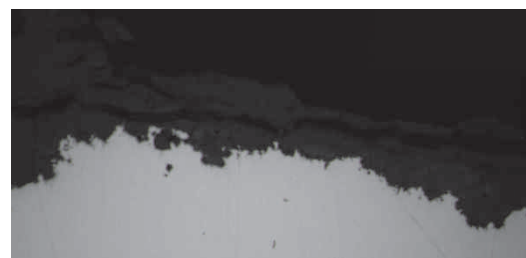


写真-6 代表断面 2(200 倍画像)
Photo 6 Microscopic Image (Section 2)

表-5 見直し後の補修計画

Table 5 Revised Repair Plan

単位: パネル

年 度			2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029
橋梁名	区間	数量 (パネル)	H23	H24	H25	H26	H27	H28	H29	H30	H31	H32	H33	H34	H35	H36	H37	H38	H39	H40	H41
下津井瀬戸大橋	東	92																11	60	21	
	西	92																		40	52
樫石島橋(トラス橋)	東	8															8				
	西	8																8			
樫石島橋(斜張橋)	東	64														33	31				
	西	64															20	44			
岩黒島橋	東	64												34	30						
	西	64													33	31					
与島橋	東	59										30	29								
	西	59											33	26							
北備讃瀬戸大橋	東	116				50	66														
	西	116		40	66	10															
南備讃瀬戸大橋	東	124						53	61	10											
	西	124	6	34						54	30										
番の州高架橋(トラス橋)	東	32										32									
	西	32									32										
合 計			1,118	6	74	66	60	66	53	61	64	62	62	60	63	64	59	63	60	61	52

る部分が見られた。このことは、採取した試験体4体とも同様な傾向を示した。

このように、一断面で見た場合であっても一律の劣化状況を示すわけではなく、目視に基づく評価で劣化度Vと判断した管理路は、鉄素地が露出した部分を多く含んでいる結果となった。

4.2 補修方法・計画の見直し

当初の補修区分では、手摺と主桁を一時撤去が困難な部材として塗装による補修としていたが、手摺は劣化度Vの割合が高く、前述のように、鉄素地が露出した部分を多く含んでいることが判明した。また、今後更に合金層の消失、鉄素地の露出が進行すると想定されたことから、再めっきによる補修が望ましいと考えられた。

そこで、手摺を再めっき補修とする場合の施工性の検証を行った。検証は、南備讃瀬戸大橋で実際に管理路手摺の撤去、再めっき、再設置までの流れを確認した。手摺の撤去・設置は、補剛桁部材間の狭い作業空間での搬入出となるため、橋体への接触がないよう慎重さを要する作業となるが、施工性に大きな問題はないことを吊橋形式の橋梁で確認できた。

このことから、平成 28 年度より補修実施予定であった南備讃瀬戸大橋では、平成 20 年度の判定で劣化度Vが 68%と高い割合を占めており、その後、劣化度が進展していることが考えられたことから、手摺部の補修を再塗装から再めっきに変更した。

瀬戸大橋の橋梁形式には、吊橋、斜張橋、トラス橋があるが、斜張橋及びトラス橋は、吊橋と桁構造や管理路設置位置が異なるため、管理路部材の搬入出の方法を再度検討する必要があるが、以降の補修区分は、管理路主桁のみを再塗装とし、手摺、グレーチング及びエキスパンドメタルは再めっき処理として全体計画の見直しを行った。見直した長期計画を表-5 に示す。手摺を再めっきとした場合、再めっき処理に要する期間(現地撤去～

再めっき工場での処理～現地設置)が全体工程の中でクリティカルとなり、年間の施工量が 60 パネル程度と減少するため、手摺の補修仕様を塗装とした場合よりも工期が伸びる結果となった。また、手摺を塗装とした場合と再めっきとした場合の費用を比較すると、手摺を再めっきとした場合は、手摺の搬入出による交通規制回数増のため、1 パネルあたり 1.35 倍にコストが増加する結果となった。一般的に海峡部橋梁における溶融亜鉛めっき部材の補修は、再めっきよりも再塗装の方が経済的であることが知られている³⁾が、瀬戸大橋管理路の補修では、再めっきに溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっきを用いており、従来の溶融亜鉛めっきよりも長期の耐久性が期待できる。今後は、劣化度予測に基づく LCC 比較を行い、適切な維持管理方法(再補修開始時期、補修方法、等)に関する検討をしていく必要がある。

5. 新たな劣化度評価手法

瀬戸大橋では、引き続き管理路の補修を行っていくことになるが、適宜、劣化度を再評価しながら優先順位の決定及び補修計画の見直しを行う必要がある。また、補修を完了した再めっき部材についても、劣化の進行度を見極め、次回補修のタイミングを検討しなければならない。これらの判断材料として、定量的な劣化度評価が不可欠であるが、めっき層の劣化の進行度は部分ごとに異なり、人力による目視評価は、個人差があることから定量的な評価手法とは言い難い。平成 24 年度には、外観目視によらない、より定量的な劣化度評価を行うことを目的に、電磁膜厚計及び表面粗さ計による計測結果と、最も確実な方法である顕微鏡観察による残存めっき厚結果との相関を把握する検討を実施したが、必ずしも明確な相関は確認できない結果となった⁴⁾。そこで、平成 27 年度には、管理路劣化度の定量評価のための新たな手法

として、画像解析による自動判別手法の導入を検討している。図-6 に劣化度自動判別事例を示す。これは、デジタルカメラで撮影した JPEG データの色情報を解析し、劣化度別に 5 段階に分類した画素数の占める割合から劣化度を判定するものである。

自動判別による判定を検証するため、自動判別結果と顕微鏡観察結果の比較を行った。結果は、図-7 のように、自動判別により劣化度Ⅴと判定された東面は顕微鏡観察結果で鉄素地まで腐食しており、劣化度Ⅳと判定された上面は、顕微鏡観察結果で合金層が残存していた。このことから、自動判別結果と顕微鏡観察結果とは相関性があり、劣化度の定量評価手法として有効であることがわかった。このような劣化度の自動判定が可能となれば、経年変化の定量的データの蓄積につながり、よりの確な補修計画策定の重要な判断材料になることが期待される。

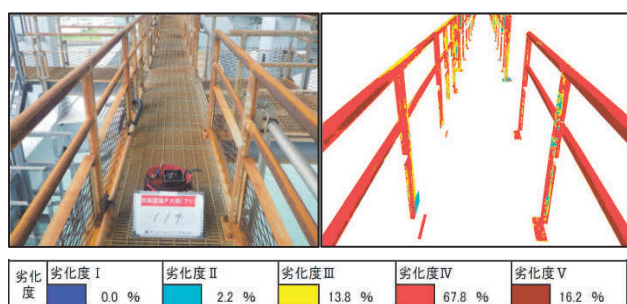


図-6 自動判定事例(左：元画像、右：判定結果)

Fig. 6 Image Analysis (Left: Original Photo, Right: Result)

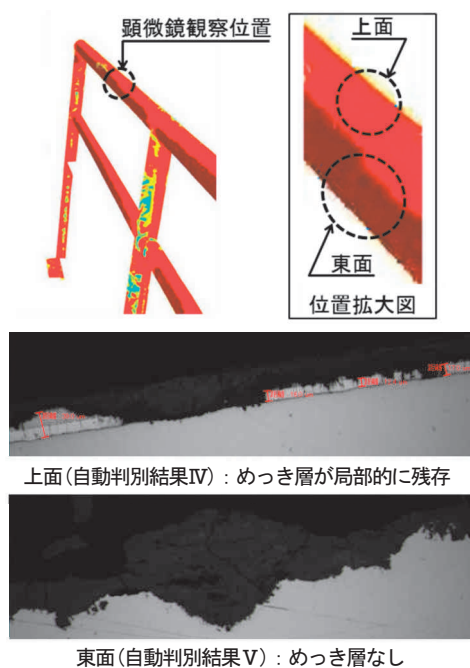


図-7 自動判別結果と断面観察結果の比較

Fig. 7 Comparison between Image Analysis Result and Microscopic Image

6. おわりに

本検討で得られた知見をまとめると以下の通りである。

(1) より耐久性、施工性及び経済性に優れた補修方法を確認することを目的に実施した試験塗装の結果、現行の仕様(WH仕様)と比較して塗装工数と経済性の両方に優位となる仕様は確認できないものの、いずれかが優位となる仕様があることがわかった。

(2) 目視に基づく評価で劣化度Ⅴと判定した実橋の管理路手摺を一部撤去し、めっき層の有無について顕微鏡観察を実施した結果、鉄素地が露出した部分を多く含んでいることが判明した。また、施工性の検証を実施したところ、撤去・再設置が可能であることを確認出来たため、手摺の補修方法を再塗装から再めっきに変更した。

(3) 画像解析による劣化度自動判別手法は、顕微鏡観察結果と相関があり、定量的な劣化度評価手法として有効であることがわかった。

今後の課題として、下記のことが挙げられる。

(1) 施工の効率化の検討

平成28年度より手摺を再めっき補修に変更したことで、瀬戸大橋管理路の補修が完了するまでの期間が延びるため、年間の施工量を増やすために効率的な施工方法の検討が必要となる。

(2) 劣化度の定量データの蓄積

適切な長期計画策定及び補修仕様の選定には、劣化の進行度の把握が必要不可欠であり、画像解析による自動判別手法などを利用し、劣化度の定量評価結果を蓄積していくことが必要となる。

(3) 補修計画見直し及び補修仕様の検討

管理路のように施工が長期間に及ぶものは、蓄積した劣化度の定量データに基づき、随時、補修計画の見直しを行うとともに、新しい補修仕様の適用可否について追跡調査を実施していく必要がある。また、熔融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっきにより再めっきした部材の劣化傾向の把握を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 森山彰、貴志友基：海上橋梁管理路の劣化傾向と補修、本四技報、Vol.38、No.122、pp22-27、2014.3
- 2) (社)日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧、2005.12
- 3) 杉本健：劣化した亜鉛めっき部材の補修検討、本四技報 Vol.29、No.104、pp21-26、2005.3
- 4) 楠原栄樹、三坂誠己：熔融亜鉛めっき部材管理路の劣化度評価手法の検討、土木学会第67回年次学術講演会、2012.9

因島大橋・大島大橋ハンガーロープ塗替え塗装

Suspender rope re-painting of Innoshima Bridge and Ohshima Bridge

森脇 正生 Masao Moriwaki

しまなみ尾道管理センター
橋梁維持課長

林 昌弘 Masahiro Hayashi

しまなみ今治管理センター
橋梁維持課長

藤澤 幸廣 Yukihiro Fujisawa

しまなみ尾道管理センター
橋梁維持課長代理

小河 正次 Shouji Ogo

しまなみ今治管理センター
橋梁維持課長代理

概要

CFRCハンガーロープの塗替え塗装は、浸せき塗装、はけ塗りの2工法がある。本稿では、浸せき塗装を実施している因島大橋、はけ塗りを実施した大島大橋での適用に当たっての検討事項、施工における改良点、施工状況を報告し、それぞれの施工における課題等を取りまとめた。

There are two methods for re-painting of CFRC(Center Fit Rope Core) type suspender rope. Namely, one is dipping painting by using dipping machine, and the other is manual painting by using paint brush. The former was applied in the repainting work at Innoshima Bridge, and the latter was applied at Ohshima Bridge. In this report, we will describe the studies prior to the application, improved points, actual application, and issues to be solved in the future by each method.

1. はじめに

本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という。）の吊橋のハンガーロープには、鋼より線を用いたCFRC（Center Fit Rope Core）タイプとポリエチレン管で被覆された平行線を用いたPWS（Parallel Wire Strand）タイプの2種類がある。本四連絡橋の吊橋10橋のうち、来島海峡大橋3橋を除きCFRCタイプが使用されており（明石海峡大橋ではごく一部に使用）、その総本数は2,680本である。ハンガーロープは、取替え可能な部材であるが、その交換には膨大な費用が必要となる。このため、本四高速では、長寿命化によるライフサイクルコスト削減を目指して、ロープの腐食状況を定量的に把握する非破壊検査手法として全磁束法を開発し、ロープの腐食状況に対応した補修を実施している。

大鳴門橋では、ハンガーロープソケット近傍において腐食が発生しており現在「内部充てん工法」による補修を実施中である。また、瀬戸大橋については、定着部近傍のはけ塗り部での腐食が確認され部分補修塗装を平成18～20年度に実施した。両橋とも一般部においては、全磁束測定結果から内部腐食はほとんど見られない状況である。

本稿は、本四連絡橋のハンガーロープ塗替え塗装を本格的に実施した、因島大橋と大島大橋について施工の効率や作業環境の改善に向けた工夫、改良点及び課題等を報告するものである。

2. ハンガーロープの概要

因島大橋と大島大橋のハンガーロープの外径は因島大橋Φ54、大島大橋は中央経間中央の一部はΦ50、それ以外はΦ48のロープを使用している。鞍掛部及び定着部は架設後の上塗りが困難なため工場塗装を、それ以外の部位（以下「一般部」という。）は架設時の塗装損傷を配慮して現場塗装で施工されている。CFRCロープ一般図を図-1、現場塗装仕様を表-1に示す。

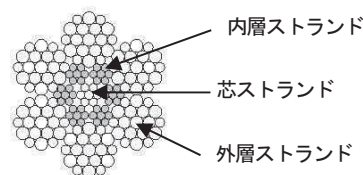


図-1 CFRCハンガーロープ一般図

Fig.1 Cross section of CFRC suspender rope

表－1 ハンガーロープ現場塗装仕様

Table 1 Painting specification for suspender rope

橋梁名	種別	第1層	第2層	第3層	第4層	第5層
因島大橋	はけ塗り	塩ゴム系鉛酸カルシウムプライマ (35)	塩ゴム系鉛酸カルシウムプライマ (35)	塩ゴム系鉛酸カルシウムプライマ (35)	HBS K 5602 塩化ゴム系中塗 (35)	HBS K 5602 塩化ゴム系上塗 (25)
	浸せき (因島側の側径間)	HBS K 5606 厚膜型エポキシ下塗 (130)	HBS K 5602 塩化ゴム系上塗 (35)			
大島大橋	はけ塗り	HBS K 5606 厚膜型エポキシ下塗 (40)	HBS K 5606 厚膜型エポキシ下塗 (40)	HBS K 5606 厚膜型エポキシ下塗 (40)	HBS K 5608 ポリウレタン中塗 (30)	HBS K 5608 ポリウレタン上塗 (30)

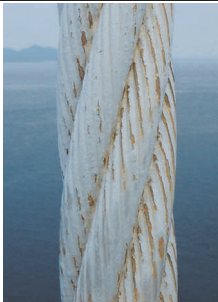
()内は標準膜厚: μm

3. ハンガーロープ劣化状況

因島大橋は昭和58年12月、大島大橋は昭和63年1月に供用した。供用後約25～29年経過した平成24年時点においての状況を、表－2に示す。

表－2 劣化状況の特徴

Table 2 Characteristics of deterioration of suspender rope

	因島大橋	大島大橋
写真		
特徴	ワイヤ凸部の塩化ゴム系塗料は消耗し、素線亜鉛めっきのさびが進行しておりさび色となっている。外層ストランドの谷部にもさびが見られる。	ワイヤ凸部のポリウレタン上中塗りが消耗しエポキシ下塗(赤色)の露出が多くみられる。さびや腐食はほとんど見られない。

劣化状況は両橋ともに外層ストランド表面のワイヤ凸部の中・上塗りが消耗しているが、因島大橋は下塗りの塩ゴム系鉛酸カルシウムプライマも消耗し亜鉛めっき素線のさびが発生してきている状況である。大島大橋は下塗りのエポキシ樹脂塗料がめっき素線を保護しておりさび等はほとんど見られない状況であり、塗料による劣化形態の違いが確認された。

大島大橋は、ハンガーロープ全数の70%において、表－2の写真に示す下塗り塗膜の露出が50%以上の変状であった。

因島大橋の因島側側径間は、建設時に浸せき塗装を実施したが、劣化状況は、はけ塗り区間より若干良い程度である。

CFRCロープの内部の劣化状況については、本四高速では全磁束法による測定を実施し、健全性を確認している。

因島大橋では平成14年に、大島大橋では平成18年に調査を行い、腐食が軽微であることを確認していた。その後の進行状況について平成23年に確認したところ、ロープ中に新たな腐食箇所の発生はなく、健全部と比較する断面減少率(最大)は因島大橋で1.3%、大島大橋で0.6%であった。

両橋のハンガーロープは、外部、内部ともに腐食による断面欠損はほとんど無く、耐荷力の低下はないものの、今後下塗り塗膜の消耗が進行し、発せい、腐食に進展する可能性が高いことから因島大橋では平成19年度、大島大橋は平成25年度から予防保全としての塗替え塗装を実施することとした。

4. 施工法検討

塗替え方法の選定に当たっては、素地調整方法、塗装方法(仕様)、ハンガーロープへの近接方法について比較検討を実施した。

4.1 素地調整

素地調整は塗膜の耐久性を左右する大きな要因であり、旧塗膜の劣化度に応じて適切に行わなければならない。

表－2に示すとおり因島大橋では表面さびが発生している状況から、さび、劣化塗膜は除去してさび部は亜鉛めっきを極力残すような3種ケレンとした。一方、大島大橋は下塗り塗膜がほぼ健全でさびがほとんど見られない状況であることから、付着している油脂・粉塵等を除去するとともに、塗り重ね塗膜の付着性を良くするためのアンカーパターンを形成する4種ケレンを基本とした。

(1) 因島大橋の素地調整

因島大橋では平成11年のハンガーロープ解放調査で内層ストランド付近の赤さびを調査した結果、ハンガーロープの腐食原因は、塗膜の経年劣化等により腐食因子である雨水がロープ内部に浸入することであると考えられている²⁾。その雨水の浸入対策として、外層ストランド谷部へ、またその奥に塗料が充てんされることはストランド内部の腐食環境の改善となると考えた。

そのため、外層ストランド谷部においても劣化した旧塗膜が確実に除去できる工法として平成15年度に超高圧水素地調整機(写真－1)を用いた現場試験を実施し、その施工仕様が確立されている²⁾。しかし、高コストであることや素地調整後の塗装までのインターバル等施工上の問題点が多かったため採用するには至らなかった。

このため素地調整は、本格的に塗替え塗装に着手した平成19年度から、ディスクサンダー等電力工具を使用した従来の人力工法で実施することとした(写真－1)。しかし、従来の工法の施工能力は3種ケレンということもあり20～30m/人日程度しかできず作業効率や作業環境が悪く、作業効率等の向上性確保の観点から機械化素地

調整装置（以下「本装置」という。）を開発することとした³⁾。



超高压水素地調整

人力素地調整

写真-1 素地調整方法

Photo 1 Surface treatment methods

本装置は、実橋実験及び試験施工により改良を重ね平成22年度から本格的な運用を開始した。

装置は、ゴンドラに2台固定して（図-2）ゴンドラを上下（1m/分）させハンガーロープを2往復することにより素地調整を行う。直径約200mm、高さ約400mmの円筒形であり、内部にブラシを上下4段で合計72個設置し、カム駆動モーターを回転させ、偏心カムにより固定された本体フレーム内の可動枠を上下に3mmずつ往復振幅させながら、ロープの撚りに沿って回転し、ロープ表面の塗装やさびを除去することができる（図-3、写真-2）。

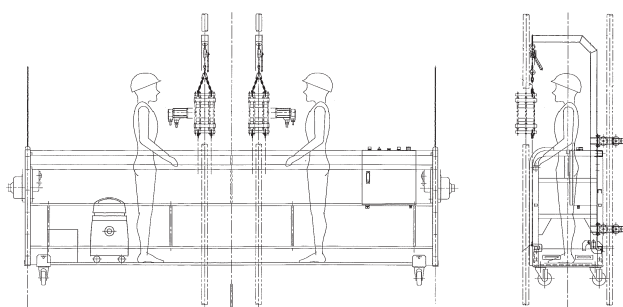


図-2 機械化素地調整装置のゴンドラへの取付け方法

Fig.2 Surface treatment machine and gondola

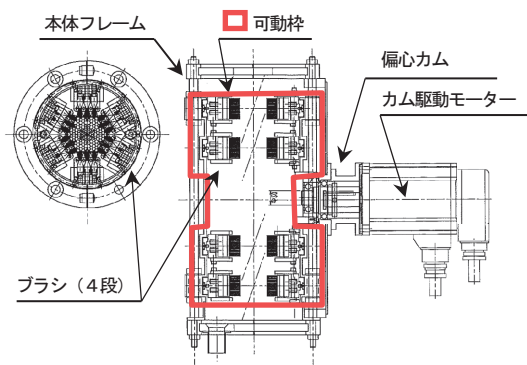


図-3 機械化素地調整装置

Fig.3 Detail of surface treatment machine

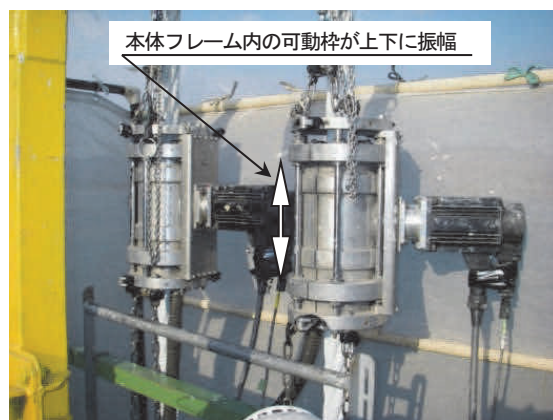


写真-2 機械化素地調整装置

Photo 2 Detail of surface treatment machine

ブラシは、ストランドの形状に合致した1組3個のブラシで構成されており、各ブラシの背面のバネにより一定の力でロープに押し付けている（図-4）。

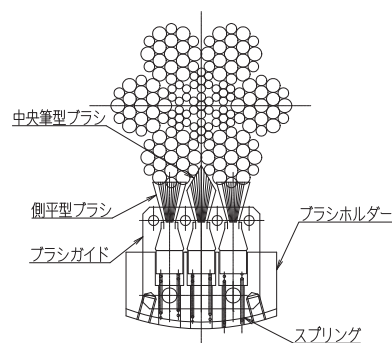


図-4 ブラシ構造

Fig.4 Detail of brush

除去した粉塵は、集塵機で集積する構造となっていることから飛散を防止することができる。本装置を使用することで、作業従事者の労力負担が軽減され、集塵機での粉塵回収によりゴンドラ内の作業環境の向上が図られている。

平成25年頃から素地調整作業中に、本装置の異常停止が頻発した。この原因は、本装置モータの許容耐振能力を超えて装置本体に振動が発生していたことで装置が停止していたものであった。

平成27年度に対処方法として、フレキシブルカップリング（本装置本体のたわみ吸収）と防振ゴムの取り付けにより振動を抑える改造（写真-3）の試験を実施し、平成28年度から新装置により施工を実施中である。これにより作業中の異常停止不具合はかなり改善されており、今後実施する他橋に展開されると期待する。

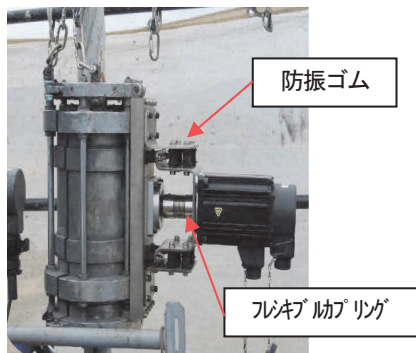


写真-3 改造した機械化素地調整装置
Photo 3 Improved surface treatment machine

(2) 大島大橋の素地調整

大島大橋のハンガーロープには腐食はほとんど無く、その素地調整は劣化塗膜を除去し活膜を露出させる4種ケレンを基本とした。この場合は、機械施工で優位となるさび、腐食部のケレン品質確保に問題が少ないことから経済性により従来の人力施工とした。

劣化塗膜部の素地調整は、小判型ブラシを用いた手ケレンにより行い、さび部については電動工具を用いた。

作業時に使用するゴンドラは、4.2(2)で後述するように、供用中の道路に近接するため、落下物やケレンかす、塗料飛散に対する対策が非常に重要となる。

ケレンかすの飛散対策として、ゴンドラ周囲にメッシュシートを設置し、向かい合う小型ゴンドラ2台を隙間無く囲い一体として使用する計画とした。また、床面にはコンパネを設置し、更にハンガーロープ間の開口部にはゴムシートを敷くことにより、完全に隙間を無くす養生を行った(図-5、写真-4)。

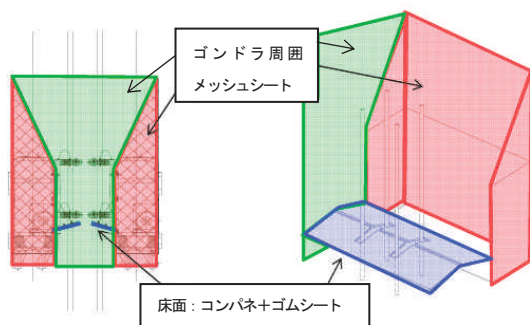


図-5 ゴンドラ養生状況
Fig.5 Scaffolding net for gondola



写真-4 ゴンドラ養生
Photo 4 Scaffolding net for gondola

ゴンドラ吊り下げ用のロープや、電源ケーブルについては、風により車道側に振れ出すのを防止するため、ハンガーロープに振れ止め用のワイヤーをかけることとした。

これらの対策により、素地調整時のケレンかすのみならず、塗装時における塗料のゴンドラ下への落下を防ぐことができ、無事故で工事を完了することができた。

4.2 塗替え塗装

CFRCロープの塗装方法は、はけ塗と浸せき塗装の2工法がある。一般にはけ塗に比べて浸せき塗装の方が、ハンガーロープ外層ストランド谷部への塗料充てん性がよく、遮水性が期待できることから因島大橋CFRCロープの塗替え塗装は浸せき塗装を基本とした。

一方、大島大橋では、4.2(2)で後述する施工条件の制約から小型ゴンドラを用いた人力によるはけ塗により実施した。

(1) 因島大橋の塗替え塗装

因島大橋ハンガーロープの塗装仕様を表-3に示す。

ハンガーロープの塗替え塗装は、「保安全管理要領2-1 塗替塗装」のX2、X3の塗装系(厚膜型エポキシ、ふっ素)を適用することとされているが、ハンガーロープの活荷重変動及び温度変化に伴う伸縮への追従性を考慮し、主ケーブルの塗装仕様X4に準じて柔軟性を有する塗料を採用することとした⁴⁾。

塗布量については、最適な塗料使用量の確保、浸せき塗装器からの塗料漏れや塗装完了後のロープ表面の変状防止の観点から浸せき塗装器の下降速度と塗料粘度を変化させて試験を行い、表-4のとおりとしている⁵⁾。

表-3 因島大橋ハンガーロープ塗替え塗装仕様

Table 3 Painting specification for suspender rope of Innoshima bridge

項目	適用部位	素地調整	第1層	第2層	第3層
ハンガーロープ修繕A	ハンガー中央部 浸せき部	3種	柔軟型エポキシ樹脂塗料 1,000g/m ²	柔軟型ふっ素樹脂塗料 700g/m ²	
ハンガーロープ修繕B	ハンガー下部 簡易浸せき部	3種	柔軟型エポキシ樹脂塗料 700g/m ²	柔軟型ふっ素樹脂塗料 350g/m ²	
ハンガーロープ修繕C	ハンガー端部 はけ塗り部	3種	柔軟型エポキシ樹脂塗料 300g/m ²	柔軟型エポキシ樹脂塗料 300g/m ²	柔軟型ふっ素樹脂塗料 120g/m ²

表-4 塗料速度と粘度

Table 4 Painting speed and viscosity

	塗料速度	塗料粘度
中 塗	1.0m/分	15ポアズ
上 塗	1.0m/分	3ポアズ

ハンガーロープ位置による塗替え手法と浸せき塗装フ

ローを図-6に示す。

修繕Aは、浸せき塗装でゴンドラに設置した浸せき塗装器を2台使用して塗装を実施した。

修繕Bについては、楠剛桁の定着部で浸せき塗装器が設置できないため簡易浸せき器（写真-5）を用い人力で施工する。これは、定着部材があるため刷毛塗りではロープ裏側の塗装ができないためである。

修繕Cは、ケーブル作業車及び足場を使用してはけ塗りとした。

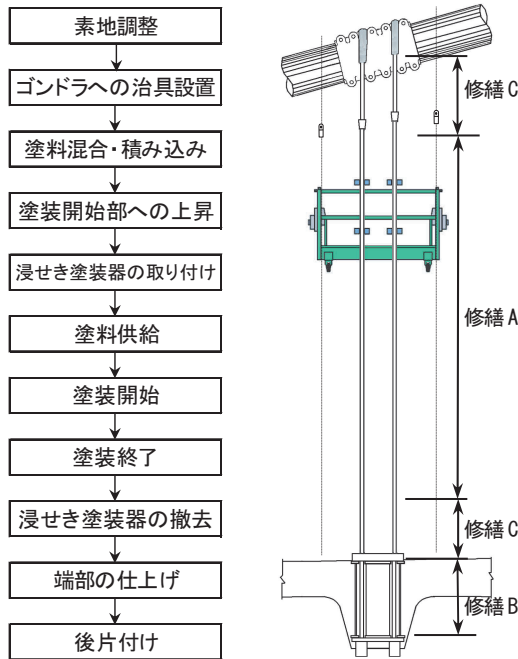


図-6 ハンガーロープ浸せき塗装フロー

Fig.6 Working flow of dipping paint for suspender rope



写真-5 簡易浸せき器による塗装

Photo 5 Painting by small dipping machine

浸せき塗装は塗料貯留槽に塗料を供給しゴンドラの下降（1m/分）により塗装される。浸せき塗装器には塗料の漏洩防止のための塗料シール用刷毛を3段設置できる構造となっている。また、漏れた塗料は塗料受けで回収される（図-7、写真-6）。

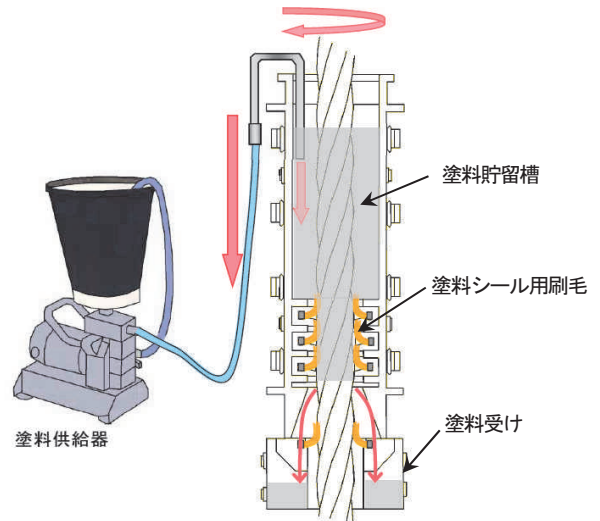


図-7 浸せき塗装器概要図

Fig.7 Detail of painting by dipping machine

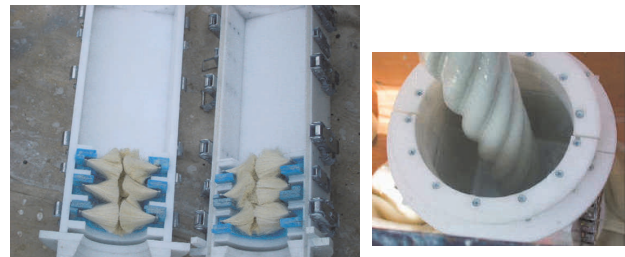


写真-6 浸せき塗装器内部と塗装状況

Photo 6 Detail of dipping machine and paint process

(2) 大島大橋の塗替え塗装

大島大橋ハンガーロープの施工に当たっては、以下の課題があった。

- ・桁断面は4車線であるが、片側1車線の対面通行で供用しており、供用側（下り線側）ハンガーロープ塗替え時は、ほぼ直下を車両が通行する（図-8）。
- ・供用側の自動車防護柵と端部防護柵とのスペースが1.5mと狭隘（道路側ハンガーと防護柵間0.6m）（写真-7）。
- ・海側ハンガーロープと端部防護柵とのスペースが約0.4mと狭隘

特に、供用側ハンガーロープ施工の際、片側交互規制を行うと、大島大橋近接の宮窪トンネルを含む長い延長（約2.8km お客様の待ち時間が最大10分程度）となり、影響が大きいことから、規制が極力少ない工法を選定する必要があった。

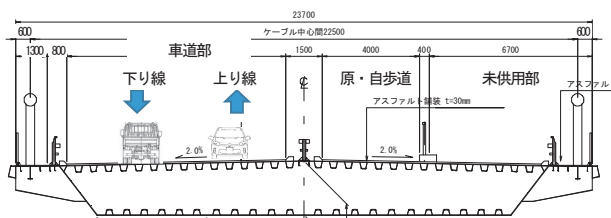


図-8 大島大橋断面図

Fig.8 Cross section of Ohshima bridge



写真-7 供用側作業可能範囲

Photo 7 Working area on Ohshima bridge

そのため、ハンガーロープ一般部の施工は、供用側防護柵外側の狭隘部内でゴンドラ盛換え時の作業が可能で、交通規制が不要な汎用型の小型ゴンドラで行うこととした。

小型ゴンドラは、1.2m×1.5mの作業スペースであり、自動ケレン装置や浸せき塗装の機材をゴンドラ内に配置することが困難であることから、塗替え塗装は、はけ塗りで行うものとした。

塗装仕様は、大島大橋では下塗り露出は多いがさびはほとんど生じてなく塗膜割れも無いことから、柔軟型塗料でなく保安全管理要領に示されたエポキシ樹脂塗料とふっ素樹脂塗料を採用した。ただし、下塗り露出箇所が多いことから、表-5に示すように、下塗り1層を加えて3層で施工するものとした。

表-5 大島大橋ハンガーロープ塗替え塗装仕様

Table 5 Painting specification for suspender rope of Ohshima bridge

素地調整	第1層	第2層	第3層
3種 4種	HBS K 5606 厚膜型 エポキシ下塗	HBS K 5624 エポキシ 樹脂塗料中塗	HBS K 5625 ふっ素樹脂塗 料上塗
	180	140	120

数字は標準仕様量: g/m²

塗装は、ハンガーロープの最上部から下降しながら、ストランド撚り部の谷間及び素線間に塗料を充てんするように入念に施工を行った。小型ゴンドラ1台に塗装工1名を配置し、同じハンガーロープを向かい合って施工す

ることで、塗り残しを防いだ (写真-8)。



写真-8 塗替え塗装施工状況

Photo 8 Painting work at Ohshima bridge



4.3 ハンガーランプ撤去 (大島大橋)

ハンガーランプは、建設時に補剛桁のハンガー定着の作業性に配慮し、桁定着部でハンガーロープを鉛直にし、長さや間隔を保持するための治具である。部材に塗膜の劣化及びさびが見られたため、今後の維持管理性を考慮し撤去の可能性を検討した結果、折れ角の変化により付加される水平力に対して、ハンガーロープ及びハンガーカラーへの影響は無いことが確認されたため、撤去をすることとした (図-9)。

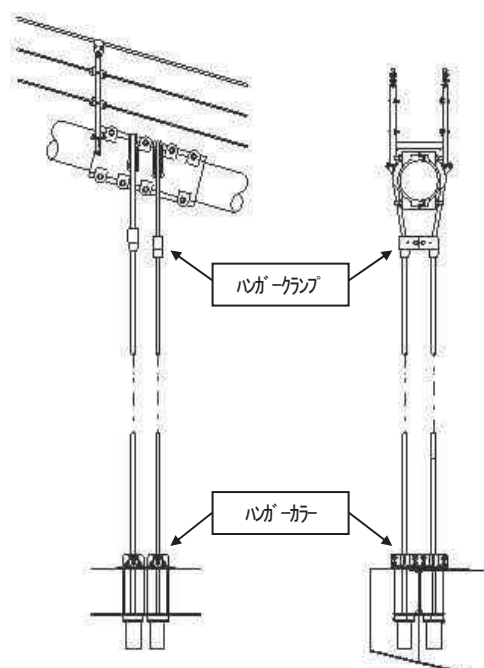


図-9 ハンガーランプとハンガーカラー

Fig.9 Suspender clamp and suspender collar

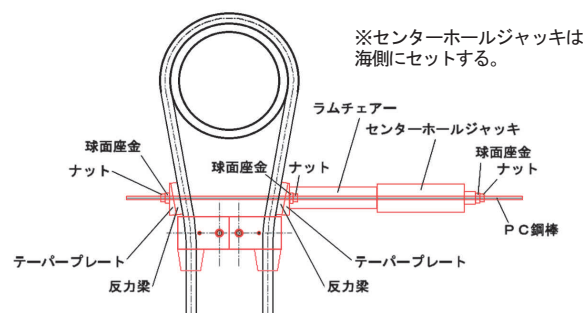


図-10 ハンガーランプ撤去方法

Fig.10 Removing of suspender clamp

撤去は、ケーブル作業車及び足場にて、図-10に示すセンターホールジャッキを用いて行った。ハンガーランプ部でハンガーロープを絞り込んでいることから、ハンガーロープが斜めになっていること、ハンガーランプを撤去後、センターホールジャッキの軸力を解放するとハンガーロープが横に広がる際に、ハンガーロープごとに角度が異なることから、テーパプレートと球面座金により角度の変化に対応する構造とした。

ハンガーランプ撤去後にはハンガーロープが広がり、鞍掛部に空隙ができることから、ケーブル送気用乾燥空気の漏洩が無いかを確認しシール材を充てんした。

なお、ランプ撤去によりハンガーロープの撓り戻りが生じ、塗膜の割れが発生することが考えられたため、塗替え塗装はランプ撤去後に実施した。

4.4 ハンガーカラーシールの補修（大島大橋）

塗替え施工時にハンガーカラーシール部付近に素線の破断を発見したため、全磁束法による断面減少率の測定を実施した（写真-9）。

その結果、断面減少率は1%程度であることから、耐荷力に対する問題は無く、吊橋ハンガーロープ管理要領に基づき補修塗装を実施することとした。また、この他のシール部付近にさび等の劣化が見られるハンガーは、シール補修未実施箇所であり、シールの劣化が見られること、劣化によるハンガーカラー内部への水の浸入が懸念されたことから、予防保全の観点から未補修箇所全てのシール補修を併せて実施した（写真-10）。

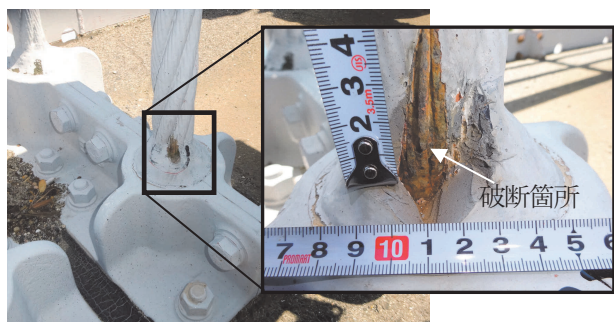


写真-9 ハンガーロープ素線の破断状況
Photo 9 Breaking of suspender rope wire

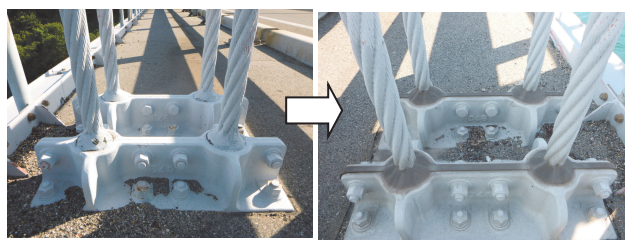


写真-10 ハンガーカラーシール補修
Photo 10 Improvement of sealing at suspender collar

5. ハンガーロープ塗替え塗装の課題

5.1 浸せき塗装工法

(1) 風による不稼働の影響

浸せき塗装は、はけ塗に比べ1回の塗布量が多くなるため、その塗膜の状態は、施工時の風による影響を受けやすい。

因島大橋においては、中塗り施工後の強風により塗料が風下に押され、シワが発生する状況が確認された（写真-11）。

これは表面乾燥後に風による力により内部塗料に流れが起こり発生するものと推測される⁵⁾。この事象発生状況により過厚膜や不均一な塗膜厚状態となるため手直し補修を実施している。

また、これまでの経験から平均風速7m/s以上となると予想される時は浸せき塗装を中止して対応した。



写真-11 中塗り塗装後のシワ
Photo 11 Runs of base coat

図-11に因島大橋の他、大島大橋、瀬戸大橋、大鳴門橋の平均風速について整理した。これによると因島大橋は、本州四国連絡橋の中でも最も風の穏やかなエリアにあることが分かる。瀬戸大橋や大鳴門橋で浸せき塗装を実施する場合は、稼働率が大幅に低下することが懸念されたため、風速による中止基準を7m/sから10m/s程度に向上させる改善が必要となった。このため平成28年度に中塗塗料の改良検討を実施し、平成29年度に現地施工でその効果を検証する予定である。

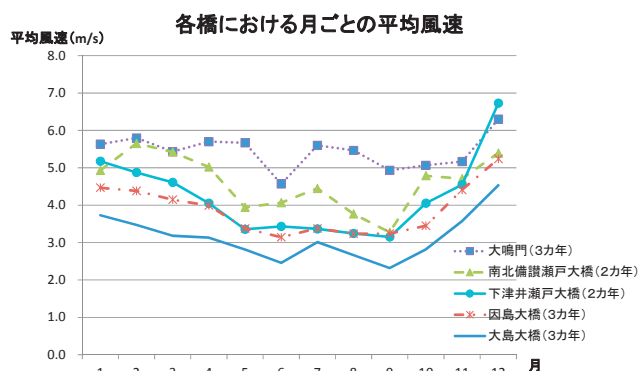
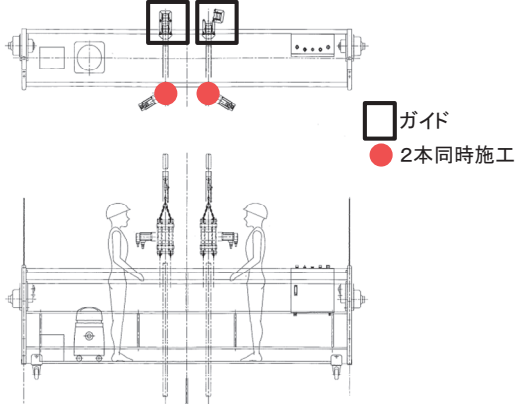
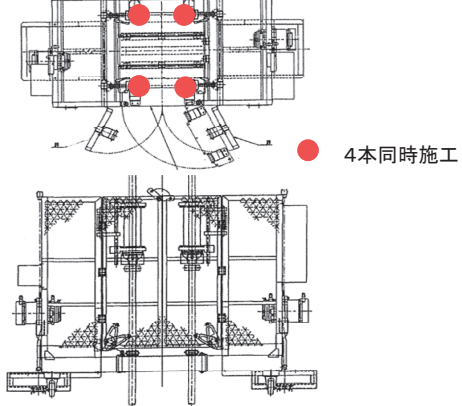


図-11 各橋における月ごとの平均風速
Fig.11 Monthly mean wind speed at each bridge

表-6 2本同時施工と4本同時施工の評価

Table 6 Comparison of methods

形式	【従来方法】 ロープ 2 本同時施工	【新方法案】 ロープ 4 本同時施工
構造	 □ ガイド ● 2本同時施工	 ● 4本同時施工
評価	・ 1 格点 2 本ずつの施工となり、塗装済みのハンガーロープにガイドをとる必要があるため、塗装完了後の塗装を痛めることがある。	・ 4 本同時に施工することで、工期の短縮が図られる。 ・ 塗装済みのハンガーロープにガイドをとる必要がないため、完了後の塗装を痛めることがない。

(2) 素地調整・浸せき塗装の工期短縮

因島大橋で実施中の施工方法は、1格点2本同時施工であるが、この方法は塗装完了後のハンガーロープにガイドローラーを設置するため、箇所により塗装完了後の塗装を痛めてしまうことがあり、補修塗装を行う必要があった。

1格点4本のハンガーロープを同時に施工することができる専用ゴンドラを製作すれば、塗装完了後のハンガーロープにガイドローラーを設置する必要がなく、塗装完了後の塗装を損傷させることもない。また、工期の短縮も図られる(表-6)。

5.2 人力施工法

小型ゴンドラを用いたはけ塗り人力施工は、狭隘な箇所での施工が可能であり、2台のゴンドラを組み合わせることで、4本同時施工が可能となり、施工の効率が良くなるという利点がある。一方、施工者の技量に左右されるため、施工の均一性に劣ることや、劣化状況が厳しい場合には、施工の効率や品質確保の観点から補修方法として選定できない場合があり、限定的な工法であると考えられる。

6. おわりに

ハンガーロープ塗替え塗装は今後他橋への展開が予想されるが、ハンガーロープの定着構造(桁定着、ブラケット定着)により仮設足場構造が異なることに対する施工性の確保、ハンガーロープ劣化状況による素地調整レベル、規制の影響による施工上の制約など橋梁ごとに

検討が必要と思われる。これまで実施してきたハンガーロープ塗替え塗装で培ったノウハウが活かされることを期待する。

謝辞

ハンガーロープ塗替え塗装は、これまでに機械化素地調整装置や浸せき塗装器の開発と改良を長年実施してきた。特に素地調整装置の開発は、当初から携わってこられた(株)ブリッジ・エンジニアリング及び(株)技術開発研究所との共同開発であり、担当者の皆様の精力的な努力の賜であります。誌上をお借りしてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 前田泰男：因島大橋ハンガーロープ解放調査について、本四技報、Vol. 25、No. 97、pp. 16-22、2001. 8
- 2) 岩垣富春、末廣弘靖、小原 誠：ハンガーロープの長期防錆を目的とした浸漬塗装工法の確立、本四技報、Vol. 30、No. 107、pp. 9-14、2006. 9
- 3) 東 秀樹、花田正一、貴志友基、山根 彰：吊橋ハンガーロープ素地調整装置の試験施工、本四技報、Vol. 35、No. 116、pp. 14-16、2011. 3
- 4) 本州四国連絡高速道路(株)：保全管理要領
- 5) 森脇正生、吉丸直明、橋本 龍：因島大橋塗替塗装工事(主塔・ハンガーロープ)、本四技報、Vol. 33、No. 112、pp. 14-18、2009. 3

来島海峡大橋ハンガーロープ定着部調査

Investigation for the anchor zone of suspender rope of Kurushima-Kaikyo Bridge

林 昌弘 Masahiro Hayashi

しまなみ今治管理センター
橋梁維持課長

小河 正次 Shoji Ogo

しまなみ今治管理センター
橋梁維持課長代理

高田 大資 Daisuke Takata

しまなみ今治管理センター
橋梁維持課

概 要

来島海峡大橋のハンガーロープ定着部は、被覆PWSロープが鋳込まれたハンガーソケットをハンガーピンで定着する構造となっている。ハンガーソケット口元部は熱収縮ポリエチレン被覆で鋳込み部の防水を行い、ハンガーピン定着部は変性シリコンシールより水の浸入を防いでいる。供用後17年が経過し、桁側ハンガーロープ定着部の変性シリコンシール等に変状が多く確認されたため、補修計画策定に先立ち、ハンガーロープ定着部内部の変状を確認する目的でソケット口元部現況調査及びハンガーピン抜き取り調査を実施した。その結果、ハンガーソケット口金やハンガーピンの一部に腐食が確認された。

本論文では、これらの調査結果から明らかにした劣化メカニズムと今後のハンガーロープ定着部の保全方針を報告する。

In the anchor zone of suspender ropes of Kurushima-Kaikyo Bridges, socket in which prefabricated wire strand rope is cast is anchored to the girder with pin. Mouth of the socket and pin are waterproofed with thermal shrinkable polyethylene coating and modified silicone seal, respectively. Since 17 years have passed and deteriorations were found on the seals, investigation of the mouth of the socket and the pin was conducted to make a repair plan. As a result, we have found corrosion in the steel sleeves and pins.

In this paper, we will describe the deterioration mechanism obtained from these investigation results and the maintenance policy for anchor zone of suspender rope in the future.

1. はじめに

ハンガーロープは、主ケーブルから桁を吊り下げる部材で、桁の重量や自動車荷重等を主ケーブルに伝える重要な部材である。来島海峡大橋ハンガーロープでは、図-1に示すようにハンガーロープ端部のハンガーソケット（以下「ソケット」という。）を主ケーブル及び桁のピンプレートにハンガーピン（以下「ピン」という。）で定着する構造としている。

ハンガーロープ一般部は、防水性に優れるポリエチレン被覆の上に、景観面に配慮し、耐候性に優れるふっ素樹脂被覆を施した二重被覆となっている。ハンガーロープ定着部（以下「定着部」という。）については、変性シリコンシール（以下「シール」という。）により防水を行っている。

供用後17年が経過し、ハンガーロープ一般部は健全であるものの、桁側定着部のシール等に変状が多く見られたため、補修に先立ち、定着部内部の変状を確認し、補

修構造の検討、今後の保全方針を定めることとした。

本論文では、図-1に示すように定着部をソケット口元部（以下「口元部」という。）とピン定着部に分けて検討した結果を報告する。

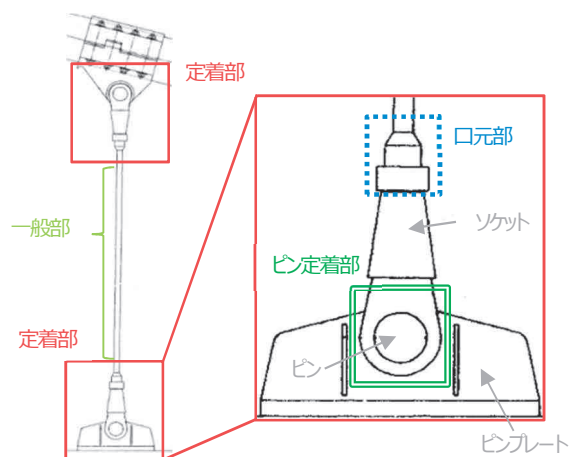


図-1 ハンガーロープ構造

Fig.1 Detail of suspender rope

2. 口元部の保全方針

2.1 口元部構造

口元部の構造を図-2に示す。ハンガーロープの垂鉛めっき鋼線には、常時及び暴風時における主ケーブルと桁との相対変位により口元部に角折れを生じ、二次応力（曲げ応力）が付加される。この応力による曲げ疲労を防止する目的で、ソケット口金（以下「口金」という。）内部に緩衝材としてエポキシ樹脂が充てんされている。なお、ソケットと口金はねじ構造によって接続されている。

鋳込み部の防水機構として、口金とふっ素樹脂被覆の段差部にブチルゴムがテーパ状に設置され、口金及びふっ素樹脂被覆上に熱収縮ポリエチレン（以下「熱収縮PE」という。）が施工されている。さらにその上に景観面の配慮からゴムラッピング（以下「ラッピング」という。）＋ハイパロン塗装が施されている。また、ソケット上面にも、水の浸入を防ぐためにシールがテーパ状に施工されている。

2.2 口元部変状

口元部では、ラッピング内部への水の浸入の恐れがあ

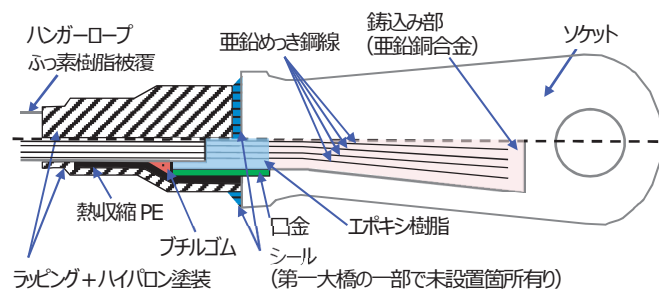


図-2 口元部構造

Fig.2 Detail of suspender socket mouth

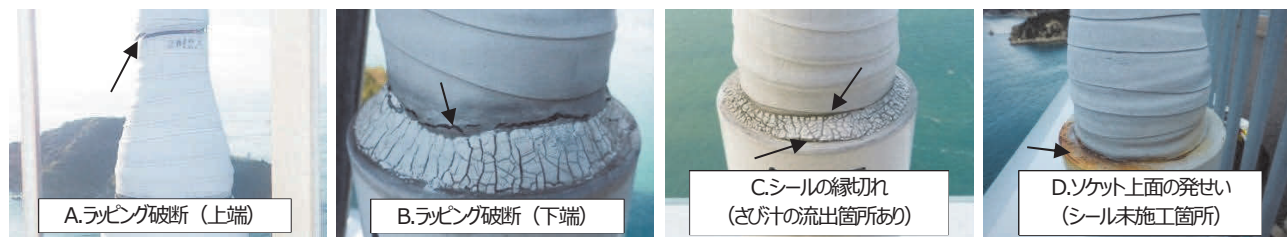


写真-1 ソケット口元部変状

Photo 1 Deteriorations near socket mouth



写真-2 S54 開放状況

Photo 2 Opening investigation of socket mouth (S54)

る4種類の変状が確認されている（写真-1）。平成13年に最初の変状が確認され、経年とともに変状数が増加し、平成27年度の調査では、上記の変状が、全ハンガーロープの約7割で発生している。

外観上確認できる変状は、ラッピング及び口元シールの劣化であり、防水機能を期待する内部の熱収縮PEの健全性及び口金の発せい状況、特に口金内部へ水が浸入し、腐食しているかが不明である。このため、補修計画策定に先立ち、定着部内部の変状を確認することを目的にラッピングの開放調査を行うこととした。

2.3 ラッピング開放調査

(1)調査箇所

変状が進行している4箇所ではラッピングの撤去を実施した。調査箇所の変状は表-1のとおりである。変状種別のA～Dは、写真-1に示すものである。

(2)調査結果

上端・下端にラッピングの破断があるものの、さび汁の流出のないN76では内部は健全であった。

上端・下端にラッピングの破断及びシールの縁切れ、さび汁の流出があったS54では、熱収縮PE施工時の固定用針金（以下「針金」という。）の腐食破断が確認されたが、口金については、変状は見られなかった（写真-2）。

表-1 調査箇所

Table 1 Investigated suspender ropes

橋梁	位置	変状 種別	外観				
			シール		ラッピング破断		ソケット 発せい
			縁切れ	さび汁	上端	下端	
来島第一	N46	A+D	(未施工)		有	無	有
	N48	A+C	有	有	有	無	無
	N76	A+B	無	無	有	有	無
来島第二	S54	A+B	有	有	有	有	無

ラッピング下端に破断はないもののシールの縁切れ及びさび汁の流出があったN48の外観及び内部状況を写真-3に示す。ソケット上面及び針金の変状は見られなかったが、熱収縮PEを撤去したところ、口金の腐食が確認された。しかし、針金は腐食しておらず、口金の腐食も針金より上部では見られず、口金内部への水の浸入はなかった。

ソケット上面に発せいのあるN46は、N48と同様の変状であった(写真-4)。

針金の腐食は、ラッピング破断部からラッピングと熱収縮PEの間に水が浸入したためと推定される。

一方、口金の腐食については、ラッピング下端から浸入した水が熱収縮PEの下にまわり、口金を腐食させ、体積膨張により熱収縮PEの付着が切れ、腐食が上方向に進展したと考えられる。なお、針金による拘束によって腐食の上方向への進展が止まり、口金内部への水の浸入はなかったと推定される。

開放調査の結果、懸念されていた口金内部への水の浸入は無かったものの、今後、口金の腐食が著しく進行すると、断面欠損により口金が変形しやすくなり、ハンガーロープに生じる角折れを低減する口金内部のエポキシ樹脂の剛性を確保できなくなることによって、二次応力の増加につながることが懸念された。そのため、水分

の浸入を防ぐ補修を実施することとした。

2.4 補修方針

調査結果より、外観目視でさび汁の流出が確認されていても、針金の腐食の可能性も有り、口金が腐食しているとは限らないことが明らかになった。そのため、外観目視によりさび汁の流出が確認された場合は、ラッピングの撤去を行い、発せい箇所を特定することが必要である。また、ラッピング下端に破断がある場合は、ラッピングと熱収縮PEの間に水が浸入し、針金の腐食を生じ、最終的には口金の腐食へと進展することが考えられるため、やはりラッピングの撤去が必要であり、上記内容を反映して、図-3に示す補修工法選定フローを作成した。このフローに従い、計画的に補修を実施する予定である。なお、ソケット上面のシールには、ひび割れ等の軽微な経年劣化が全ハンガーで見られることから、変状種別A～Dの有無にかかわらず、撤去し再施工することとした。

補修工法B・Cのシリコンシートは、ハイパロンの製造中止により、ラッピングに代わる材料として、付着性・施工性に配慮し、使用することとした。

補修工法Dについては、現場で熱収縮PEによる復旧が不可能なため、熱収縮PEと同程度の強度、伸び性能を有しているシリコンシートを熱収縮PE及びラッピング



写真-3 N48 開放状況

Photo 3 Opening investigation of socket mouth (N48)



写真-4 N46 開放状況

Photo 4 Opening investigation of socket mouth (N46)

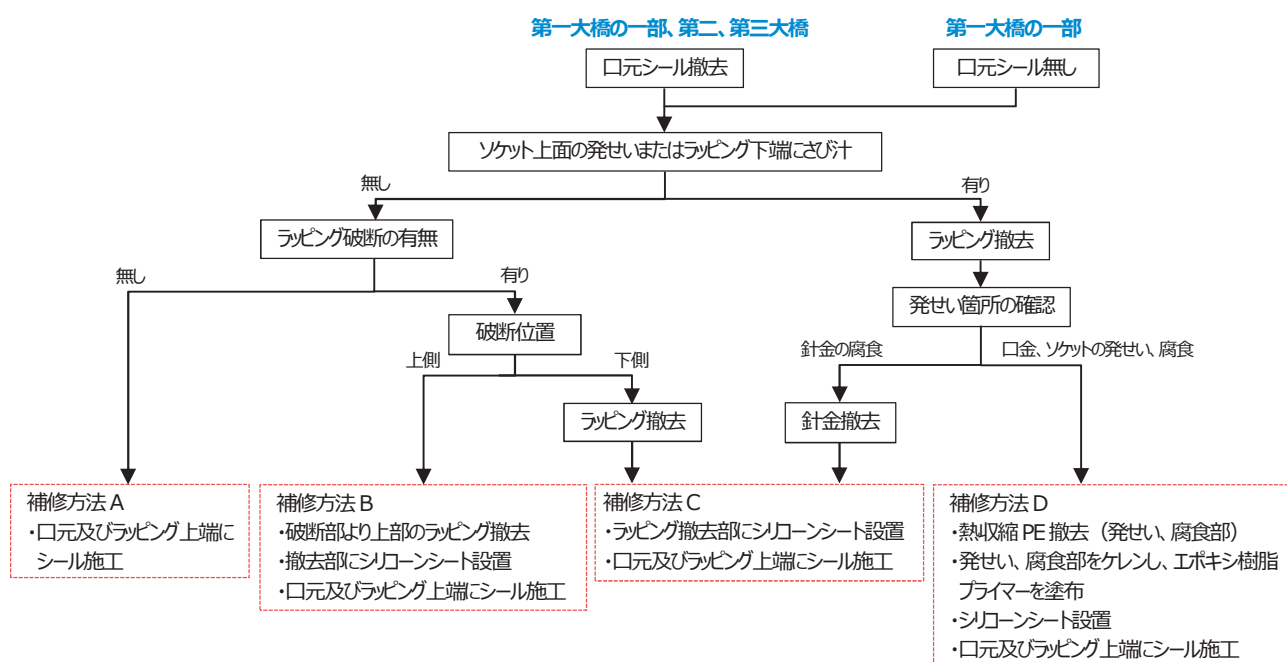


図-3 補修工法選定フロー

Fig.3 Flow diagram of repair method selection

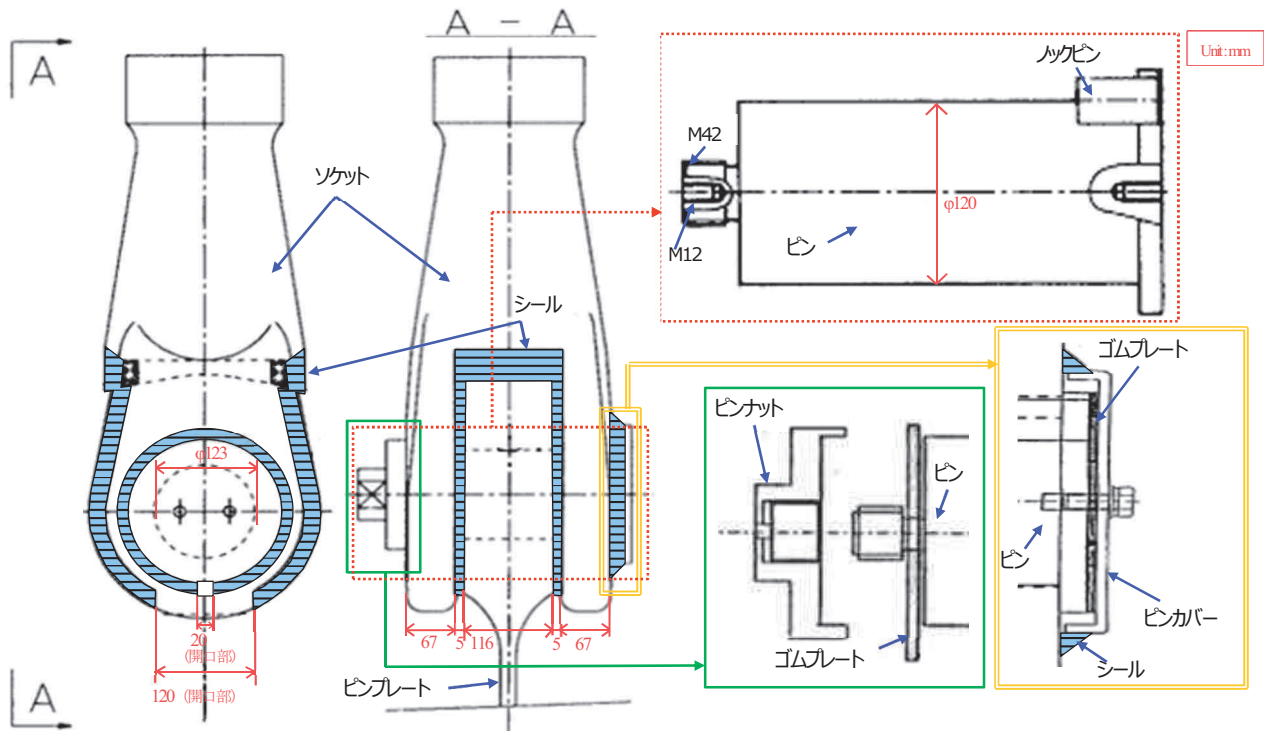


図-4 ピン定着部構造

Fig.4 Detail of pin

の代替材料として使用した。なお、シリコンシートは、17年間相当の耐候性試験では問題ないものの、施工実績が2014年からのため、長期耐久性が不確実であり、経年変化について注視していく必要がある。

3. ピン定着部の保全方針検討

3.1 ピン定着部構造

ピン定着部の構造を図-4に示す。ピン（材質SCM45）には、非常に大きな支圧応力が加わるため、塗装ではなく硬質クロムめっき2層（1層あたり50μm）が施されている。ピンと接触するソケット及びピンプレートの孔内面は、塗装が施されている。

ピン端部にはM42の雄ねじ加工が施されており、ピンナットによって固定されている。ピンナット内部の防水としてゴムプレートが取り付けられている。また、M42ねじの中央にM12の雌ねじがあり、ボルト止めすることで、ピンナットの弛み防止を図っている。

ピン上部にはロックピンが設置されており、ピン自体が回転しない構造となっている。また、ロックピンの抜け防止とピン孔部への浸水防止を目的としてピンカバーが設けられている。

ソケットとピンカバー及びソケットとピンプレートとの隙間には、内部への水の浸入を防ぐ目的でシールを施工しており、下面側には水抜きのための開口部を設けている。なお、シール施工はハンガーロープ架設後にまとめて実施したため、建設時に最大で約19ヶ月の間、シール未施工期間があったことがわかっている。

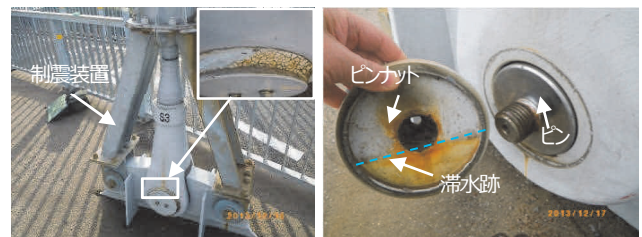


写真-5 ピン定着部変状

Photo 5 Anomaly at pin nut

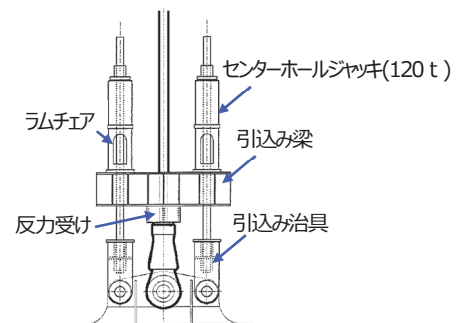


図-5 ピン抜き取り治具

Fig.5 Pin extraction device

3.2 ピン定着部変状

ピン定着部も供用後17年が経過し、ピンカバーとソケット間のシールの変状が顕著となっている。シールの補修計画策定に先立ってピンカバー及びピンナットを取り外したところ、ピンナット内部に滞水跡が確認された（写真-5）。そのため、定着部内部の変状を確認することを目的にピン抜き取り調査を実施することとした。

3.3 ピン抜き取り調査

ピンの抜き取りには、図-5の治具を使用し、ハン

ガーロープの荷重を預けた。

(1)調査箇所

桁側定着部の調査は、手すりの撤去、自歩道の規制等が必要のない塔付きのピンを中心に第一～第三大橋の計17箇所で実施した。また、来島海峡SAにあるシール未施工の主ケーブル模型（同構造・同部材・同スケール）についても比較対象としてピンの抜き取りを行った。

主ケーブル側定着部については、ピンの抜き取りが困難なため、ピンカバー及びピンナットを取り外し、内部の確認を行った。

(2)調査結果

調査箇所が多くで何らかの変状が発生しており、抜き取り調査を行っていない箇所でも生じていると推定される。また、抜き取りを行った箇所はおおむね同様の変状であり、シール未施工期間の違い等による差異は認められなかった。一方、主ケーブル側定着部についてはピンナット内部に発せいが見られたが、桁側と比較して変状は軽微であった。

以下のa)～c)に桁側定着部の部材ごとの変状を示す。

a)ソケットの変状

全ての調査箇所で変状が確認された。ソケット内部の状況を写真-6に示す。ピンナット内部のねじ底に滞水が確認された。これは、ピンナット弛み止めボルトのスプリングワッシャー(SW)の隙間から水が浸入したものと考えられる。ピンと接触しているソケット下面については支圧によって塗装がピンに圧着し、鋼材面が露出し

ており、軽微な発せいがコバ面を中心に見られた。しかし、腐食による断面欠損は見られなかった。ピンと非接触である側面及び上面については、塗膜変状もなく健全な状態であった。

b)ピンプレートの変状

17箇所中12箇所で変状が確認された。ピンプレート下面に滞水跡が見られた（写真-7）。これは、ピンプレートとソケットの隙間からシール未施工期間に水が浸入したことが原因と考えられる。また、コバ面に僅かな発せいが見られたが、ピンプレート内面は、ピンの接触面、非接触面ともに発せいは確認されなかった。

c)ピンの変状

17箇所中15箇所で腐食が確認され、上面側3箇所、下面側15箇所と下面側で多く発生していた。下面側の腐食は写真-8に示すように円周方向線状に発生しているものが見られ、図-6に示すシール開口部直上にあたることから、開口部からの水分供給により腐食が進展したと考えられる。なお、シール未施工の来島海峡SA主ケーブル模型では、上面側にも腐食が見られたことから、シールによる遮水が有効であることが明らかになった。

また、ピン中央部のピンとピンプレート孔の隙間は、下面側に3mmあり、滞水によるピンの腐食が見られたものの、支圧面の腐食は見られなかった。

上記より推定される水分浸入経路を図-7に示す。

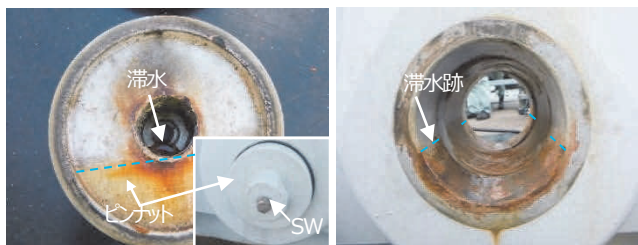


写真-6 ソケット内部状況
Photo 6 Condition of pin hole of socket



写真-7 ピンプレート内部状況
Photo 7 Condition of pin hole of pin plate

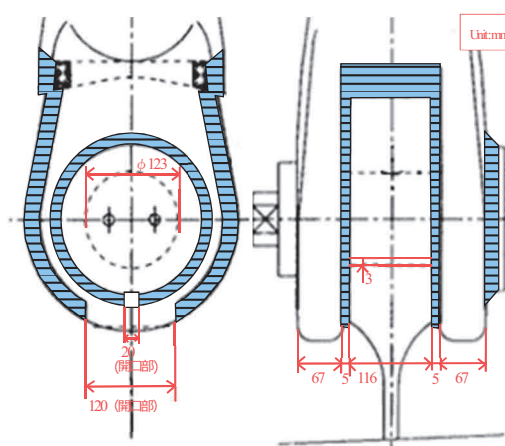


図-6 シール開口部位置
Fig.6 Opening of seal

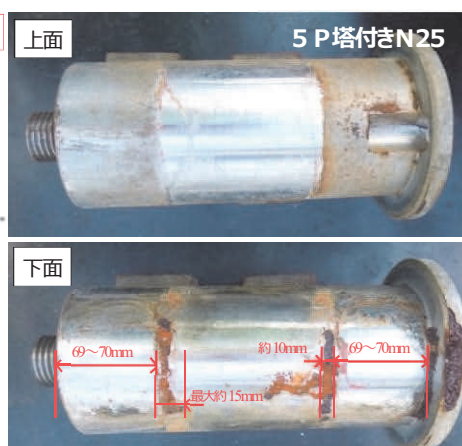


写真-8 ピン腐食状況
Photo 8 Corrosion of pin

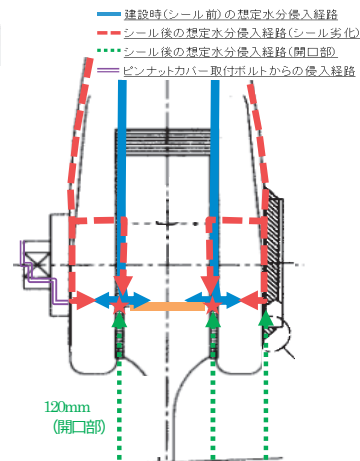


図-7 水分浸入経路
Fig.7 Water intrusion route

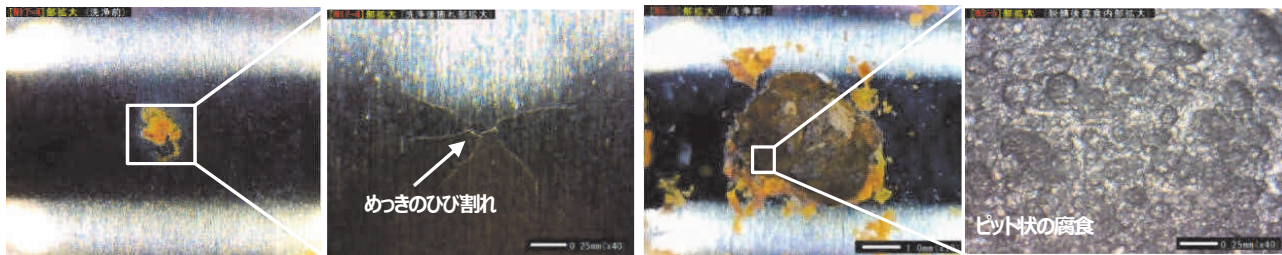


写真-9 顕微鏡画像

Photo 9 Microscopic image of pin



写真-10 調査位置（腐食深さ、成分分析）

Photo 10 Surveyed position (corrosion depth, component analysis)



写真-11 腐食深さ

Photo 11 Corrosion depth

3.4 詳細調査

腐食原因推定及び腐食量確認のため予備品と交換したピン（第一大橋N3、N17）の詳細調査を以下の項目で実施した。

(1) 外観調査

外観調査として、外径寸法の測定、浸透探傷試験(PT)、デジタル顕微鏡による観察を実施した。

外径測定結果は設計の許容値内であり、異常は見られなかった。また、PTについても目視でめっきの剥離が確認できた部分以外には指示模様は現れなかった。しかし、デジタル顕微鏡による観察結果では、写真-9に示すPTで確認できない微小なひび割れが確認された。また、ピット状の腐食が確認された。

(2) めっき厚測定

ピン表面からめっき片を採取し、レーザー顕微鏡によりめっき厚の測定を行ったところ、148～172 μ mで、設計値 100 μ m に対して十分な厚みがあり、問題ないことを確認した。また、測定位置による偏りも見られなかった。

(3) 腐食深さ測定

腐食の激しかった N17 のピンを対象にシリコン印象材を用いて腐食部のレプリカを作成し、デジタル顕微鏡により腐食深さの測定を行った。写真-10 に示す 6 箇所での破線の位置で調査を実施した。腐食深さは 0.40～0.64mm であり、腐食は軽微であった（写真-11）。

(4) 成分分析

電子線微小分析(EPMA)により組成の分析、粉末X線回折法により鉄さび種類の特定制を行った。調査位置は、写真-10の白線で囲った3箇所である。EPMA分析の結果、3箇所全てでClが0.5～0.9%存在していたことから、塩化

物による腐食の促進が考えられる。

また、粉末X線回折法の結果、下地保護性の高い α -FeOOHが64%程度と主成分であるが、塩化物環境下で生成し、下地保護性の乏しく、さびを進行させる β -FeOOHも15%程度存在していることが確認された。また、酸化剤としてさびを進行させる γ -FeOOHが8%程度含まれている。

(5) 腐食メカニズムの推定

詳細調査の結果及び前章のピン抜き取り調査より、ピンの腐食メカニズムは以下のとおりと推定される。

- 1) シール未施工期間にピンとピンプレート及びソケットの隙間に塩化物を含む水が浸入
- 2) シール施工後も開口部及びシール劣化箇所から新たな水分の供給
- 3) 内部の水分が乾燥せず長期間滞留
- 4) めっきの微小なひび割れから浸入した水との接触によりピン母材に腐食が発生

水分の供給によって、さびを進行させる β -FeOOH及び γ -FeOOHが含まれるため、今後も腐食が進行する恐れがある。

3.5 補修方針

ピンの断面欠損は最大0.6mmと軽微であり、また、ソケット及びピンプレートの変状についても支圧面における腐食は確認されていないため、緊急性はなく、また、大規模な補修（ピン交換等）も不要と考えられる。しかし、前章に記したとおり、今後もさびの発生及び腐食が進展する恐れがあることから、補修が必要と判断した。補修方針の決定に当たっては、腐食因子（ピン孔内に溜まった塩化物及び水分等）の除去または腐食因子（水分の供給）の遮断が考えられる。しかし、腐食因子の除去については、全てのピンを抜き取り、清掃することになり、極めて困難である。そのため、劣化したシールの再

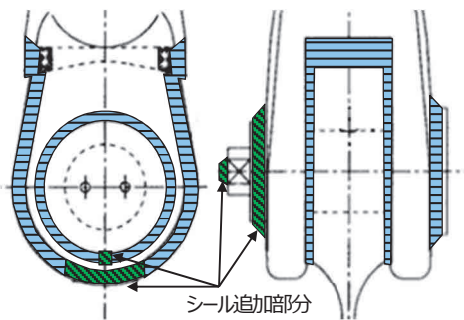


図-8 シール施工範囲

Fig.8 sealing area

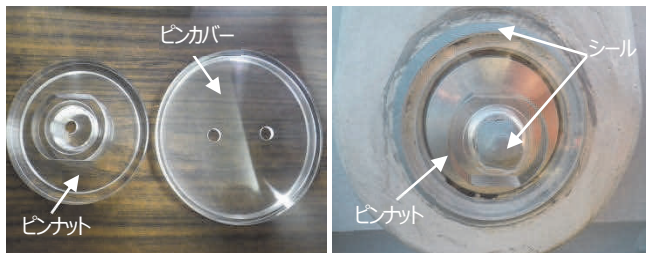


写真-12 アクリル樹脂製カバー

Photo 12 Acrylic resin pin cover and pin nut

施工及び水分の供給が懸念される開口部の閉塞、滞水が顕著なピンナットへのシールを施工し、水分の供給を遮断することとした（図-8）。

なお、水抜き弁の閉塞により内部水分の滞留が懸念されるため、5年を目処にピンを抜き、腐食の進展を追跡する予定である。追跡調査では、今回のピン抜き取り調査でピンに腐食が確認された箇所、腐食が確認されなかった箇所、予備品（新品）の箇所において、開口部の有無による腐食の進展状況を確認することとしている。調査箇所は表-2のとおりである。

また、写真-12に示すアクリル樹脂製のピンカバー及びピンナットを製作・設置し、3ヵ月ごとの定期点検（巡回点検）時にピン孔内部の湿潤状態を確認する予定である。

4. 定着部保全方針

調査結果より、口元部及びピン定着部ともに防水構造のシールの劣化による水分の供給が構造部材の発せい・腐食につながる事が明らかになった。

そのため、点検の際にはシール縁切れ及びシール滞水、シール部からのさび汁の流出、ラッピングの破断等に着目することとし、点検方法と評価基準を定めた。また、定期点検に加えて、3.5 補修方針に記したピンの腐食状態の確認等を実施し、補修方法の再評価を行う予定である。

表-2 追跡調査箇所

Table 2 Pins for follow up investigation

	開口部有り	開口部閉塞
腐食が生じているピンの進展比較	第一大橋 N3,S3	第二大橋 N20,S25
腐食が生じていないピンの進展比較	第一大橋 S65	第一大橋 S70
新品に交換したピンにおける進展比較	第二大橋 N25	第一大橋 N3,S17

5. おわりに

来島海峡大橋ハンガーロープ定着部の調査で得られた知見を以下に示す。

- ・ 口元部のラッピング破断によりラッピングと熱収縮PEの間に水が浸入し熱収縮PE固定用の針金の腐食を生じることが確認された。
- ・ 口元部のシールの縁切れ等によって、ラッピング下端への水の供給があると口金の腐食を生じ、上部へと進行することが確認された。熱収縮PE固定用の針金により短期的には口金内部には水の浸入はないものの、今後、口金の腐食が著しく進行すると、断面欠損により口金が変形しやすくなり、ハンガーロープに生じる角折れを低減する口金内部のエポキシ樹脂の剛性を確保できなくなることによって、二次応力の増加につながる事が懸念されたため、水分の浸入を防ぐ補修を実施する必要がある。
- ・ ピン抜き取り調査により、軽微ではあるものの多くの箇所に変状が確認され、抜き取りを行っていない箇所でも生じていると推定される。
- ・ ピンの腐食状況より、水抜き用のシール開口部から水分が供給される恐れがあることを確認した。
- ・ ピンの腐食深さ調査により、断面欠損は軽微であった。また、現時点では、ソケット及びピンプレート支圧面に緊急性を要する大規模な補修（ピンの交換等）は不要であることを確認した。
- ・ ピンの腐食成分の分析結果から、保護性の乏しい β -FeOOH、酸化剤としてさびを進行させる γ -FeOOHが含まれていることが判明した。水の供給により、今後もさびの発生及び腐食が進展の恐れがあるため、水分の浸入を防ぐ補修を実施する必要がある。

今後は、シール開口部からの水分の供給の有無を確認するため、ピン孔に挿入可能な温湿度計を使用し、開口部からの水分の浸入による温湿度の調査を実施する予定である。

また、平成29年度予定の他工事に合わせて、主ケーブル側のピン抜き取り調査の実施を検討している。

第19回IABSEストックホルム大会

19th Congress of IABSE, Stockholm

国際構造工学会（International Association for Bridge and Structural Engineering、以下「IABSE」という。）が主催する国際会議、第19回IABSEストックホルム大会が2016年9月21日から23日までの3日間、スウェーデンの首都ストックホルムで開催されました。IABSEは、1929年に設立された土木と建築に関連する構造工学において、計画から設計、建設、維持管理および改修に至る幅広い分野を対象とする、長い歴史をもつ学会組織です。

今回の大会テーマは、「革新的かつ持続的な設計・施工環境への挑戦」でした。大会には、48カ国から585名の技術者等が参加し、7テーマ、62セッションに別れ、352の論文発表がありました。

開会式（写真-1）とそれに続く基調講演の後、7会場にわかれて、口頭発表が開始されました。本四高速からは、長大橋技術センター総括・耐震グループの西谷リーダーが、「瀬戸大橋トラス橋の耐震補強」と題して、番の州高架橋トラス部の耐震性能照査や補強設計の結果、維持管理に配慮した補強の実施方法等について発表しました（写真-2）。

数多くの発表が行われた今回の大会でしたが、中でも、多数のフィヨルドを渡りながら建設が進められている欧州自動車道E39号線の進捗と技術的課題について、ノルウェー道路庁技術者より多数の発表が行われました。海底に設置されたアンカーと係留索で繋がれた浮体の上に吊橋を構築する案や水中トンネル案、浮き形式の橋梁案などの検討状況が紹介されました。

最終日9月23日の閉会式では、次回大会として、2017年9月に、第39回IABSEシンポジウムがカナダ西海岸のバンクーバーで開催されることが報告され、大会の幕が下ろされました。

国際会議に参加した後、北欧・英国の長大橋管理者を訪問し、意見交換、橋梁視察を行う機会を得ました。グレートベルト橋（写真-3、デンマーク）、オーレスン橋（スウェーデン）、フォース道路橋（写真-4、スコットランド）、テイマー橋（イングランド）の管理事務所を訪問して、各管理者と最近の維持管理に関する話題を中心に、補修・補強の履歴、塗替塗装の考え方や塗装仕様、ケーブル防食対策などの現状や課題等について意見交換を行いました。フォース道路橋を訪問した際には、スコットランド道路庁が建設中の多径間の斜張橋（クィーンズフェリー橋）も訪問することができました。スパンの長大化に伴う安定化対策の考え方など最新の設計・施工技術を紹介していただきました。

技術交流を行った各管理者とは、国際吊構造橋梁管理者会議のメンバーとして、これまでも活発に交流しています。今後とも、世界各地の長大橋管理者と継続した技術情報交換の重要性を再認識したところです。



写真-1 IABSE スtockホルム大会開会式



写真-2 西谷リーダーの論文発表



写真-3 グレートベルト公団との技術交流



写真-4 フォース3橋を背景に
(長大橋技術センター 総括・耐震グループリーダー 西谷雅弘)

第2回国際道路連盟アジア地域会議

The 2nd International Road Federation Asia Regional Congress & Exhibition

第2回国際道路連盟（International Road Federation：IRF）アジア地域会議が2016年10月16日から20日までマレーシアのクアラルンプールで開催されました。

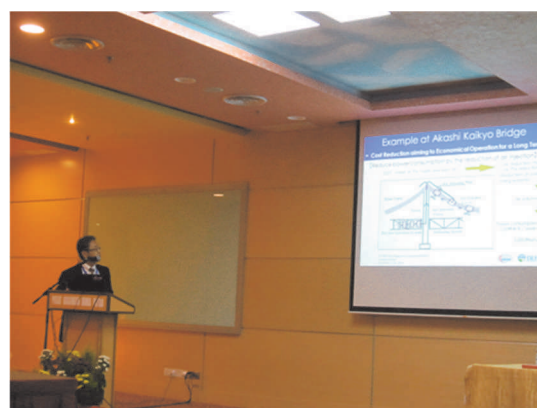
国際道路連盟は、より安全で持続可能な道路及び道路ネットワークを開発、維持することを目的に1948年にワシントンDCに設立された非政府組織で非営利団体です。国際道路連盟の世界大会は概ね4年毎に開催されており、世界中から政府・行政関係者のほか、大学や民間の道路及び道路交通関係者が多数参加しています。また、これまでにラテンアメリカ、中東、カリブ、アフリカ、アジア、ヨーロッパ・中央アジアの地域会議も開催されています。

アジア地域会議の開催は今回が2回目（1回目は2014年にインドネシアで開催）であり、56カ国から1000人以上が参加しました。会議では、舗装関連技術、アセットマネジメント、ITS、交通管理などをテーマとした100題以上の論文発表、ワークショップ、展示会、テクニカルビジットなどが行われました。本四高速からは保全部橋梁保全課の竹口課長が会議に参加し、「吊橋主ケーブルのアセットマネジメント」をテーマに、ケーブル送気乾燥システムを活用した確実かつ効率的な主ケーブルの維持管理について論文発表を行いました。また、テクニカルビジットでは、マレーシア高速道路庁（Malaysia Highway Authority, 以下「MHA」という。）の交通管理センターを視察しました。マレーシアの有料道路事業はBOT方式で整備されており、高速道路の各路線（約30路線）の交通管理業務は、各路線の異なる管理運営会社が実施しています。そのため、MHAの交通管理センターでは、各路線のリアルタイム情報を各路線の管理運営会社から収集統合し、それを利用者にウェブサイトや道路情報板などで情報発信しています。

（保全部 橋梁保全課長 竹口昌弘）



写真－1 オープニングセレモニー



写真－2 発表状況



写真－3 MHA 交通管理センター

本州四国連絡橋関連技術文献紹介 (16.08~17.01)

Technical articles related to Honshu-Shikoku Bridges

題 名	著 者	雑誌名等	巻	号	年月	頁
海峡部長大橋の保全技術	森山彰	JACIC情報110 2014 Vol. 29 No. 1			201407	6
生口橋一適材適所の合理性で、斜張橋の長大化を促進ー	木村一也	橋梁と基礎	50	8	201608	2
明石海峡大橋ーわが国が誇る世界最大支間の夢の架け橋ー	糸日谷淑光	橋梁と基礎	50	8	201608	2
多々羅大橋ー構造安全性と景観の調和ー	山口和範	橋梁と基礎	50	8	201608	2
明石海峡大橋2P主塔塗膜剥離工法検討	信重和紀 麓興一郎 江口敬一 小川和也	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
鋼床版支点部補剛材に生じた亀裂の補修	中山和真 越野勝 花井拓 阪上隆英 塩澤大輝 和泉遊以	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
熱弾性応力測定による鋼構造の疲労き裂補修対策実施効果の検証	藤本泰成 溝上善昭 花井拓 阪上隆英 塩澤大輝 東智之和泉遊以	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂の進展特性	溝上善昭 花井拓 鎌田将史 新野貴大 神田隼太	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
吊橋太径ねじ部材の疲労損傷に関する検討	高田大資 梶尾光邦 溝上善昭	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
鋼床版I桁縦桁-横桁交差部溶接継手の疲労評価	鎌田将史 溝上善昭 大爺健司 信重和紀 神田隼太	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
瀬戸大橋トラス補剛桁のオープングレーチング閉塞の影響調査	内藤将志 勝地弘 山田均 楠原栄樹	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
ASR劣化状況の違いがシラン系表面含浸材を塗布したコンクリートの水分逸散性能に及ぼす影響	川合将斗 森川英典 中西智美 楠原栄樹	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
実構造物における高耐久性ふっ素樹脂塗料の長期耐久性能の確認	大川宗男 熊井貴弘	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
重防食塗装系の剥離要因に関する調査	大塚雅裕 楠原栄樹	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2

題 名	著 者	雑誌名等	巻	号	年月	頁
含浸材によるコンクリート内部含水率の経時変化と測定時温度に関する考察	楠原栄樹 山根彰 西村徹也	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
移動機能が消失した支承の機能回復	新野貴大 貴志友基 長尾幸雄	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
瀬戸大橋ケーブル送気乾燥システムの改善	竹口昌弘 門田整達	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
吊橋縦桁支承の点検補修用簡易足場検討	大廻聡 森脇正生 尾崎泰祐	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による亀裂検出実用化システム	大藤時秀 溝上善昭 和泉遊以 阪上隆英	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による裏面亀裂の検出・評価	和泉遊以 阪上隆英 溝上善昭 森山彰 三宮広之	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
アクティブ赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート構造物の非破壊検査	阪上隆英 溝上善昭 花井拓 森山彰 竹内優人 藤本泰成 塩澤大輝 和泉遊以 遠藤健	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2
Uリブ鋼床版のビード亀裂に対する下面補修	金澤高宏 貴志友基 溝上善昭 森下元晴 西山圭介 坂野昌弘	土木学会全国大会 第71回年次学術講演会			201609	2

※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29年2月28日現在

委員長	荻原勝也	幹事長	西谷雅弘
委員	朝倉義博	幹事	明野晃治
	石原和幸		池田秀継
	磯江浩		薄井稔弘
	伊藤豊秋		大谷康史
	臼田幸生		岡本豊
	大谷康史		亀井敏行
	楠原栄樹		蔵森和生
	古村学		佐伯成巳
	竹口昌弘		遠山直樹
	西谷雅弘		中川秋男
	村田知司		花井拓
	森山彰		日高裕司
	山口和範		森幸夫
	吉本紀一		山根彰

本四技報 第128号

発行 平成29年3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>



