

本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.42 No.130 2018.3

明石海峡大橋20周年，瀬戸大橋30周年特集
Special Issue of Akashi-Kaikyo Bridge 20th
and Seto-Ohashi Bridges 30th Anniversaries

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130号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.130

【巻頭言】

失敗学……………北口雅章… 1
Study of Failure

【特集号前文】

本四高速における維持管理と技術開発……………萩原勝也… 2
Maintenance Management and technical Development of Honshu-Shikoku Bridge Expressway
明石海峡大橋供用20周年によせて……………小林義弘… 3
Thinking of Akashi Kaikyo Bridge 20th
瀬戸大橋の維持管理……………福永 勲… 5
Maintenance of Seto-Ohashi Bridges

【特集号記事】

本四連絡橋の塗替塗装に関する取組……………久米昌夫・竹口昌弘… 7
Effort to recoating for the Honshu-Shikoku Bridges
本州四国連絡橋における疲労対策……………林 昌弘・溝上善昭…15
Fatigue prevention method on Honshu-Shikoku Bridges
この10年における本四連絡橋の耐震補強……………西谷雅弘・田村 正…20
Seismic retrofit for Honshu-Shikoku Bridges in the last 10 years
吊橋ケーブル送気乾燥システムの管理20年……………貴志友基・朝倉義博…30
Management of the Dry Air Injection System for Main Cables of Suspension Bridges for 20 years
本四連絡橋 海中基礎防食のあゆみ……………鎌田将史・貴志友基・岡本 豊…38
The history of corrosion protection for underwater foundations of Honshu-Shikoku Bridges
道路維持管理設備の改善と今後の課題……………朝倉義博・吉本紀一・小野祥史・明野晃治…44
Improvement of the Road Maintenance Facilities and Future Issues

【技術論文】

瀬戸大橋斜張橋（櫃石島橋、岩黒島橋）の耐震補強設計……………西谷雅弘・田村 正・平山靖之…52
Seismic retrofit design of Seto-Ohashi cable stayed bridges (Hitsuishijima Bridge and Iwakurojima Bridge)
瀬戸大橋吊橋のグレーチング閉塞に伴う耐風安定性検討……………花井 拓・竹口昌弘・町田 陽…59
Aerodynamic stability evaluation for Seto-Ohashi suspension bridges with closed open gratings
櫃石島高架橋トラス部、与島橋2径間部の耐震補強設計……………西谷雅弘・田村 正・平山靖之…67
Seismic retrofit design of truss bridges (truss portion of Hitsuishijima viaduct and two-span portion of Yoshima Bridge)
第六伊弉高架橋塗替塗装工事における素地調整方法の比較検討……………貴志友基・長尾幸雄…75
Comparison of treatment methods for repainting of the 6th Ibi viaduct

【海外報告】

コンゴ民主共和国……………貴志友基・藤田憲二…83
Democratic Republic of the Congo

【技術ニュース】

神戸淡路鳴門自動車道 淡路島中央スマートインターチェンジ供用開始	佐伯成巳	87
Opening of Awajishima-Chuo Smart IC on Kobe-Awaji-Naruto Expressway		
第9回ニューヨーク市橋梁会議	平山靖之	88
9th New York City Bridge Conference		
Eurosteel Copenhagen 2017 (第8回鋼と複合構造に関する欧州会議)	鎌田将史	89
Eurosteel Copenhagen 2017 (the 8th European Conference on Steel and Composite Structures)		
第39回IABSEシンポジウム(カナダ)	奥村淳弘	90
39th IABSE symposium, Canada		
国際吊構造橋梁管理者会議アジア地域ワークショップ開催(神戸)	遠山直樹	91
ICSBOA Asia Regional Workshop in Kobe		
IRF世界道路会議(WRM2017)の開催	信重和紀	91
IRF 18th World Road Meeting 2017		
第9回アジア太平洋風工学会議	花井拓	92
The 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE)		
日本道路会議優秀論文賞受賞	寺嶋賢策	92
Outstanding paper award in Japan Road Conference		
国土技術研究会自由課題優秀論文賞受賞	寺嶋賢策	93
Outstanding paper award in MLIT Technology Conference		
瀬戸大橋が20世紀遺産20選に選定	池田秀継	93
Seto-Ohashi Bridges were selected as one of Top 20 of Twentieth-century heritages in Japan		
本州四国連絡橋関連技術文献紹介		94
Technical articles related to Honshu-Shikoku Bridges		
総目次		97
List of All Contents of Honshi Technical Report		

20年目を迎える明石海峡大橋

20th Anniversary of Akashi-Kaikyo Bridge



写真-1 淡路島側から望む明石海峡大橋

Photo 1 View of Akashi-Kaikyo Bridge (from Awaji Island)

30年目を迎える瀬戸大橋

30th Anniversary of Seto-Ohashi Bridge



写真-2 岡山県側から望む瀬戸大橋

Photo 2 View of Seto-Ohashi Bridge (from Okayama Pref.)

本四連絡橋の塗替塗装に関する取組

Recoating for the Honshu-Shikoku Bridges

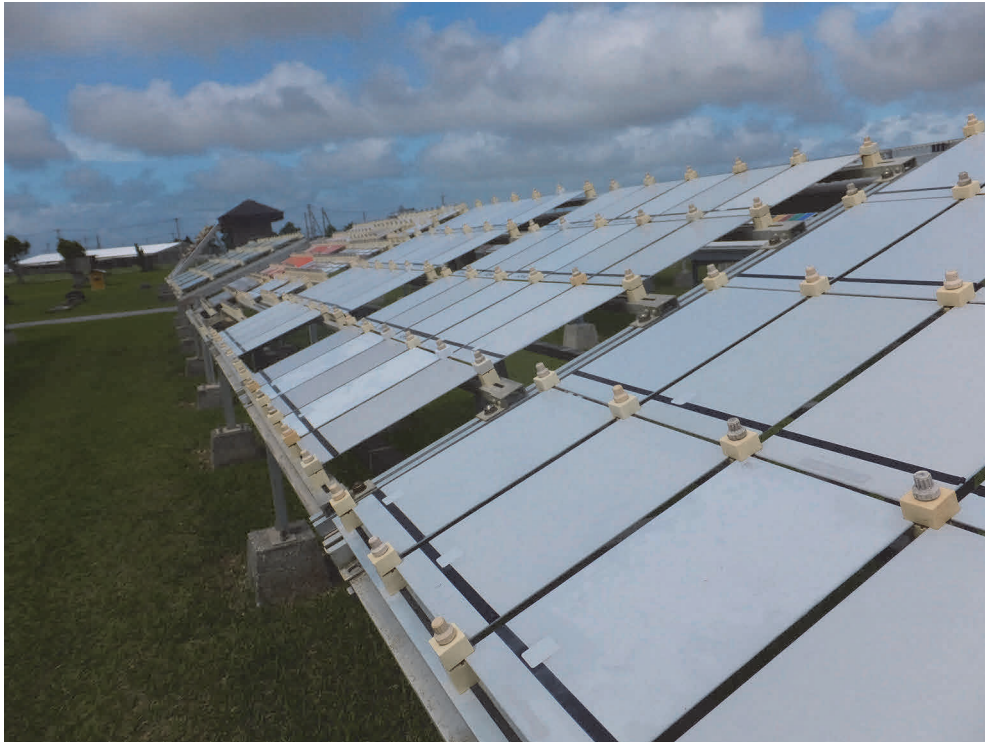


写真-3 暴露試験状況（宮古島）

Photo 3 Exposure test at Miyako Island

本州四国連絡橋における疲労対策

Fatigue prevention method on Honshu-Shikoku Bridges



写真-4 亀裂検出システムによる点検状況

Photo 4 Inspection of steel deck by developed system

この10年における本四連絡橋の耐震補強

Seismic retrofit for Honshu-Shikoku Bridges in the last 10 years



写真-5 明石海峡大橋 リンク式伸縮装置の補強工事

Photo 5 Retrofit work of link-type expansion joint (Akashi-Kaikyo Bridge)

吊橋ケーブル送気乾燥システムの管理20年

Management of the Dry Air Injection System for Main Cables of Suspension Bridges for 20 years



写真-6 大鳴門橋の送気管の取替状況

Photo 6 Replacement status of supply pipe (Ohnaruto Bridge)

本四連絡橋 海中基礎防食のあゆみ

The history of corrosion protection for underwater foundations of Honshu-Shikoku Bridges



写真-7 ドライボックスによる防食工施工（岩黒島橋 3P）

Photo 7 Dry Box for corrosion protection work on the steel caisson (Iwakurojima Bridge 3P)

道路維持管理設備の改善と今後の課題

Improvement of the Road Maintenance Facilities and Future Issues



写真-8 神戸管理センター新交通管制室

Photo 8 New traffic management room in Kobe operation center

瀬戸大橋吊橋のグレーチング閉塞に伴う耐風安定性検討

Aerodynamic stability evaluation for Seto-Ohashi suspension bridges with closed open gratings



写真-9 風洞試験状況

Photo 9 Wind tunnel test

櫃石島高架橋トラス部、与島橋2径間部の耐震補強設計

Seismic retrofit design of truss bridges (truss portion of the Hitsuishijima Viaduct and two-span portion of the Yoshima Bridge)

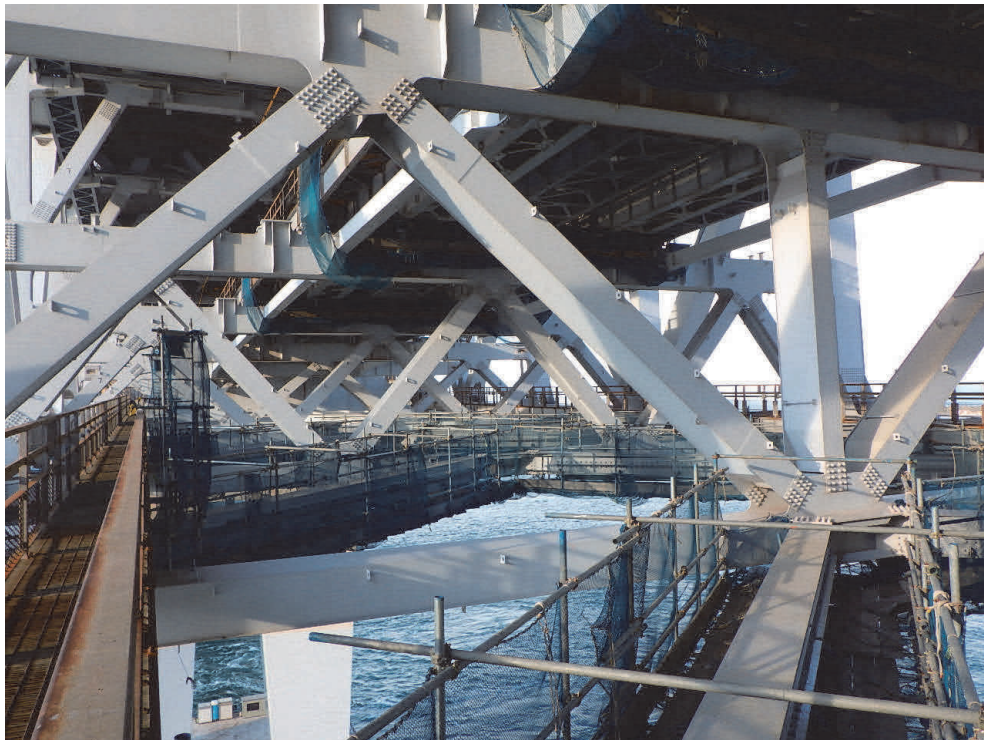


写真-10 耐震補強工施工状況

Photo 10 Seismic retrofit of truss bridges

第六伊弉高架橋塗替塗装工事における素地調整方法の比較検討

Comparison of surface preparation methods for repainting of the 6th Ibi viaduct



写真-11 湿粒ブラスト状況

Photo 11 Wet blasting work

失敗学

Study of Failure

経営計画部長 北口 雅章

Masaaki Kitaguchi

失敗学とは、聞き慣れない言葉だと思いますが、これは東京大学の畑村洋太郎教授が提唱されたものです。失敗学会のホームページには、「生産活動には、事故や失敗は付き物である。これら、事故や失敗は小さなものから、経済的損失につながるもの、負傷を伴う大きなもの、さらに多数の死傷者を出す大規模なものまである。「失敗学」は、こういった事故や失敗発生の原因を解明する。さらに、経済的打撃を起こしたり、人命に関わったりするような事故・失敗を未然に防ぐ方策を提供する学問である。」とあります。今回は、この失敗学について紹介したいと思います。

「失敗学」では、「失敗」を「人間が関わって行うひとつの行為が、はじめに定めた目的を達成できないこと」としています。「失敗学」の基本姿勢は、身の回りで繰り返される失敗を否定的にとらえるのではなく、むしろプラス面に着目してこれを有効利用しようという点にあります。つまり、失敗の特性を理解し、不必要な失敗を繰り返さないとともに、失敗から新たな知識を学ぼうというのが「失敗学」の趣旨です。

このように失敗を発展に変えることができた例としては、1940年にアメリカのワシントン州のタコマ橋の落橋事故があります。これは完成からわずか四ヶ月後に秒速19メートルの風によってタコマ橋が落橋したことにより、当時はまだ未知のものだった自励振動という現象が明らかになり、その後の風洞試験等から自励振動のメカニズムが明らかにされ、吊橋の設計技術が飛躍的に進歩したことは、我々にはよく知られた事実です。このように失敗を発展に変えることができたのは、単に失敗した技術を封印することなく失敗を真正面からうけとめ、原因を追及しさらに技術を発展させる努力を行ったからです。

しかし、失敗情報は伝わりにくく、時が経つと減衰します。一度経験した失敗が、長い年月をかけて忘れられ再び同じことを繰り返すことは珍しくありません。また、失敗情報は隠れたがりです。失敗はつい隠したくなるものです。昨今、大企業のデータ改ざん、リコール隠しなどを見ればよくわかります。さらに、失敗原因は変わりがりです。組織内で起こった失敗では組織の構造問題には全く触れず、個人のミスとして処理されがちです。このような失敗情報の特性を十分理解した上で、失敗が起きるにいたった原因や経過などを正しく分析することが重要です。

ここで私の経験した失敗を紹介したいと思います。垂水工事事務所の工務課時代に特殊水中コンクリート（今

では、水中不分離性コンクリートと呼ばれています。）の基礎実験を担当していました。特殊水中コンクリートは、1997年に西ドイツで開発され、その後わが国へも導入されました。しかし、主要構造物への適用事例が少なかったため、基礎実験では明石海峡大橋の主塔基礎に特殊水中コンクリートが適用できるかどうかを確認するための配合試験、打設実験等を行っていました。

それは、長距離流動試験を実施したときに起きました。実験を委託していた機械化研究所からは、30mの矩形の水路での提案がありました。当時、大手ゼネコンも特殊水中コンクリートの打設実験を行っていましたが、10数m程度で基礎実験の30mの打設実験はこれまでの最大規模のものでした。ゼネコンの打設実験を何回か見学して、矩形の水路では実際の流動状況を正確には再現できていないのではないかと疑問に思っていた私は、矩形の水路から扇形の水路に変更することを提案しました。しかし、費用が大幅に増となるため、最初は反対されましたが、理解ある上司のおかげで変更を認められました。流動距離が長くなれば施工設備を大幅に縮小できることから実験結果に期待していました。30mはだめでも20m程度はいけるのではないかとたかをくくっていました。しかし結果は、さんざんなものでした。やはり矩形の水路では実際の流動状況を正確には再現できていなかったようで、30mの水路を製作したにも関わらず特殊水中コンクリートは、25m付近までしか到達せず、おまけに15m付近から先は材料が分離し、先端はモルタル分だけという散々なものでした。事前に小規模な設備で確認試験を行っておけば無駄なお金を使うことはありませんでした。

しかしこの結果、特殊水中コンクリートの流動性の保持時間を配合条件に追加するという、これまでコンクリートの配合条件ではあり得ない項目を追加することにより様々な問題を解決することができました。

今回、私が伝えたかったことは「挑戦」することの重要性です。わが社は様々な技術開発を行ってきましたが、最初からうまくいくはずもなく、当然、「失敗」はつきものです。一番いけないことは「失敗」を恐れて何もしないことです。「失敗」しない人は「成功」もしません。わが社には私の「失敗」も許されたように「失敗」を許す風土があると思います。若い社員には、恐れずに何事にも「挑戦」してほしいと思います。

（参考文献：「失敗学のすすめ」 畑村洋太郎著

講談社文庫）

本四高速における維持管理と技術開発

Maintenance Management and Technical Development of Honshu-Shikoku Bridge Expressway

長大橋技術センター長 荻原 勝也

Katsuya Ogihara

1. 維持管理

本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という。）の海峡部長大橋の特徴は、巨大な構造物で、管理を行う対象部位、施設等が膨大なことが挙げられる。また、合理的構造を目指し世界的に例のない新材料や特殊構造が数多く採用されており、これらの長期的な耐久性については、管理段階で確認していく必要がある。さらに、海上にあるため、さびの発生などの劣化が早いだけでなく、点検や補修のための接近手段が限られている。その上、代替路のない重要な幹線道路であり、通行止めが必要となる大規模な工事はできるだけ避けなければならない。

このような背景から、200年以上の長期にわたり利用可能とすべく、ライフサイクルコストの最小化を図る「アセットマネジメント」の考え方を導入して体系的かつ確実な維持管理に取り組んでいる。そのアセットマネジメントを実践するために、劣化が進む前に抑制する「予防保全」を基本として保全業務を行っている。

海峡部長大橋の維持管理は、計画に基づく定期的な点検、調査により橋の状態を十分に把握し、健全度評価を行い、最適な時期に補修や対策を実施し、その結果を検証して次の点検・補修計画に活かしている。

さらに、点検・補修の効率化や課題解決のための技術開発を行い、維持管理技術を高度化することにより、ライフサイクルコストの最小化と効率的な管理を目指している。

点検により劣化状態を的確に把握し、そのデータを独自に構築したシステムに蓄積し、PDCA サイクルに従い、それを分析して劣化の予測と評価を行い、最適な補修計画を立案することとしている。補修に関する履歴データも点検結果とともに一元的にシステムに保存してグループ全体で活用することとしている。

2. 技術開発

海峡部長大橋の維持管理は、時間とともに進む劣化を抑制して橋の機能を維持するための計画的なものとなっている。このために必要な技術開発を推進しながら維持管理を行っている。代表的な技術開発を紹介する。

(1) 塗替塗装

本四連絡橋の塗装面積は約 400 万 m² と膨大であり、

塗装のコスト削減が最も重要である。

塗替塗装のサイクルを長くするように、建設段階において、長期に耐久性が期待できる重防食塗装系を開発し採用しており、明石海峡大橋以降の上塗には、耐候性に優れたふっ素樹脂塗料を採用してきた。

塗替えは、中塗と上塗のみを塗替える予防保全を基本として実施しており、上塗にはより耐候性に優れた高耐久性ふっ素樹脂塗料を開発し採用している。

(2) ケーブル送気乾燥システム

吊橋の主ケーブルは、吊橋を構成する部材の中でも最も重要な部材であり、主ケーブルは、取替えが困難なため、防食システムとして、ケーブル内部に乾燥した空気を送り込んでケーブルの腐食を抑制する「送気乾燥システム」を世界に先駆けて開発し本四連絡橋の全ての吊橋で採用している。

採用後も改良を重ねており、瀬戸大橋では、送気及び排気バンドを追加して除湿効果の向上を図り、明石海峡大橋では、従来の送気用機械設備にプレクーラーを追加し経済化・効率化を図っている。

(3) 海中基礎防食

海中基礎には、設置ケーソン工法が多く採用されているが、瀬戸大橋のいくつかの鋼ケーソンの表面で、孔食（局部的に進行する腐食）が見られたことから、その対策として、炭酸カルシウムや水酸化マグネシウム等を主成分とする物質を付着させて被膜を形成する電着防食工法を開発し採用してきた。その後更に経済化と効率化を図るため、部位により電気防食と併用している。

(4) 疲労対策

橋を構成する部材には、大型車が繰返し走行することによって、疲労による亀裂が発生することがある。疲労による亀裂のうち、鋼床版のデッキプレートと U リブの溶接部に生じた亀裂（ビード貫通亀裂）をターゲットにして、赤外線サーモグラフィを用いて、遠隔から非接触で効率よく高精度に検出できる点検手法を、神戸大学との共同研究で開発し、点検に採用している。

鋼床版のデッキプレートと U リブ溶接部に発生したビード貫通亀裂に対しては、タッピングねじを用いて、舗装を剥ぐ必要のない、下面からのみの作業で施工可能で効果的な補修法を開発し、補修を行っている。

明石海峡大橋供用20周年によせて

Thinking of 20th anniversary of the Akashi Kaikyo Bridge

神戸管理センター所長 小林 義弘

Yoshihiro Kobayashi

1. はじめに

4月5日で明石海峡大橋が供用20年を迎える。ひとえに、関係各位のご尽力並びに利用されるお客様のおかげと感謝している。日本の長大橋は、本四架橋の完成後、目立った建設はなく、計画も立ち消えとなって久しいが、世界に目を向けると、特に中国を中心として長大吊橋が盛んに建設されている。しかし、明石海峡大橋はいまでも世界一の吊橋であり、我々本四高速の技術者は、今後200年以上にわたり、長大橋建設・維持管理のパイオニアとして技術継承、新技術開発に挑戦し、万全の予防保全に努めていかねばならない。

2. 明石海峡大橋とのかかわり

私と明石海峡大橋の接点は、50年ほど前に遡る。私事であるが、明石海峡と淡路島が目前にある、明石市立林小学校に通った。当時、校舎入口を入った壁に「夢の架け橋」のような文言で大きな橋の絵があり、淡路島に橋が架かるのだと何となく思ったのを記憶している。また、JR（当時は国鉄）で、三ノ宮方面に出かけるときには、舞子から垂水辺りの明石海峡の海に、ぽつんと足場があったのを覚えている。その後、明石高专で土木技術を学び、技術者として本四公団に就職した時には、いつか明石海峡大橋の事業に携われるものと期待していた。が、なかなか神戸で勤務する機会に恵まれず、9年ほど経った昭和62年10月にようやく垂水工事事務所に配属になり、明石海峡大橋の建設工事に参画できるようになった。この時、児童の頃に見た風景が、架橋計画の調査であったことを、初めて知った。

建設段階では、工務課・第五工事に配属され、工事基地の準備や主塔の工事を担当した。その後の維持管理段階を含め、恐らく当社の中では一番長く約12年間に渡り、明石海峡大橋を直接担当している。現在は管理センター所長として再び関わらせていただき、感謝するとともに、明石海峡大橋への思い入れも深く、技術継承も含め、この橋の維持管理をライフワークとしていきたいと思っている。

3. 明石海峡大橋の維持管理の現状

ちょうど10年前の明石海峡大橋供用10周年（平成20年）頃には、本四技報 No.110（2008年3月）に当時の仁木所長が寄稿されているとおり、初期段階の不具合がおおむね出尽くし、徐々に防食機能の劣化が出始めた頃であり、私は、橋梁維持課長として、今後の長期に渡る具体的な維持管理方針策定を行っていた。

ケーブルの防食については、ケーブル開放調査や塗膜消耗量調査箇所を設置を行い、乾燥空気送気設備の効果、ゴムラッピングの劣化状況、ハイパロン塗装の消耗進展度合い等を把握した。その結果、ケーブルの素線は、建設当時の露天状態において発生した白さびがあるものの、内部湿度を安定させた状態においては腐食が進んでいないこと、ゴムの劣化がほとんど進行していないこと、ハイパロン塗装の年間消耗量が想定よりかなり小さく、残存塗膜が想定より多いことなどが確認できた。これらから、乾燥空気送気システムの機能維持とゴムラッピングを劣化させないための予防保全的な塗装をケーブル維持管理の最重要課題とした。

補剛桁では、ほとんどの部材が工場塗装で上塗りまで施工されていることもあり、一般部の劣化は進んでいないものの、高力ボルト接合部や溶接ビード、架設時の当て傷に起因した局部腐食が目立っていた。一般部の上塗塗膜消耗は極めて小さく、今後長期間に渡り塗替塗装が必要となる状況にはならないと判断し、局部補修塗装を全橋に渡り行った。この時のポイントは、作業車の移動に時間を取られることから、点検で補修箇所を事前に確認するのではなく、補修作業時に補修箇所を確認すること、ケレン+下塗り、厚膜エポキシ1層仕上げの2回アクセスで補修を終わらせたことである。この補修仕様で、塗替塗装まで保たせることとした。

主塔基礎の鋼ケーソン及び船舶緩衝工は、潮流が激しい海峡部にあり腐食が激しいが、海中部は防食作業が困難なため、交換可能な部材は、交換時期まで補修しない方針とした。

その後、これらの方針は大きく変わらずに現在に至っているが、この10年間に対応した主な維持管理事象について以下に記載する。

3.1 耐震対策工事の施工

明石海峡大橋では、耐震照査の結果、補剛桁の橋軸方向変位が大きく、主塔部のリンク式伸縮装置が破損し、路面に大きな開口が生じることが判明した。このため変位制限ケーブルを設置するとともに落下防止金物をおごの長いものに交換した。その他、アンカレッジ上屋道路桁と主塔水平材上の鋼床版桁橋に移動制限装置を取り付けた。この部材は、溶接線が交差する箱型の複雑な構造であり請負者に溶接施工試験をするよう要求したが、経験がある業者（後に全国的にも問題となった、完全溶け込み溶接で不正工事を行った下請企業）で実績を提出されたため試験施工は行えなかった。しかし、部材完了検

査に立会いすることで溶接不良を工場検査段階で全て補修させることができ、不正発覚後の確認調査では、溶接不良が全く無かったようである。発注者が、きちんと立会検査を行うことが重要であると分かる事例であった。

3.2 2P 主塔のジンク層の剥離

2P 主塔では、平成 13 年頃一部のブロックで施工不良に起因する剥離が生じ補修を行っているが、その後平成 17 年頃より施工不良だけでは説明できない剥離が徐々に生じ、現在も少しずつ拡大している。高さ 300m の主塔に近接して調査することは容易でなく、どの程度の範囲に塗膜の浮きが発生しているかを調査するため、赤外線カメラを搭載可能な磁石車輪付きの点検用ロボットを開発し、平成 30 年度より稼働させる予定である。また、剥離箇所部分補修のための塔作業車も並行して開発中であり、詳細調査と剥離箇所部分補修を平成 31 年度頃より行う予定である。なお、剥離の原因について、長大橋技術センターの研究調査では、ジンクより上層の塗料の腐食因子透過性に起因するものと推定されており、塗替塗装系の検討も進めているところである。ちなみに、全く同じ塗装仕様で製作している 3P の部材については、現時点でも全く剥離が確認されていない。

3.3 主塔制振装置の維持管理方針の見直し

主塔は完成時でも渦励振により振動するため、当初、主塔内の TMD と下部水平材部に設置した桁間ダンパーによりダブルセーフティーで制振することとして設計された。TMD の維持管理は当初 5 年ごとにメンテナンスすることとされていたが、経済性と安全性のバランスを考慮し、制振対策の再評価を実施した結果、桁間ダンパーを確実にメンテナンスし、主塔内 TMD の維持管理レベルを低減することができた。

3.4 洗掘防止工の機能確認

明石海峡大橋の主塔基礎は、軟岩を支持地盤としており特に未固結砂岩上に置いた 2P では、洗掘現象により基礎が転倒することが懸念されたため、捨石による洗掘防止工を施工している。この機能を失うことは、橋にとって致命的なリスクとなるため、深淺調査による捨石形状の確認を行っている。結果は、室内試験結果と大差ないものの若干の形状くずれが継続しているため、今後も継続して調査を進めることとしている。これらの決定においては、昭和 48 年から 63 年まで 15 年以上に渡る基礎工法と並行して検討した洗掘防止対策の記録を整理、理解した上で行ったものであり、技術継承できたものと思っている。

3.5 ケーブルバンドボルトの軸力管理

ハンガーロープ張力によるケーブルバンドの滑りを防止するため、ケーブルバンドボルトは安全率を 3 倍とつて必要軸力を導入している。が、過去の経験から橋梁完

成後も徐々に軸力が減少することが分かっており、残留軸力管理を 5 年ごとに行うことにしていた。しかし、明石海峡大橋では、ケーブルバンドが多く合理的な管理を行う為に、限界状態設計の考え方を取り入れ、一律の安全率では無く、荷重と耐荷力の比較評価による必要な残留軸力測定時期を設定することにした。また、測定はケーブル作業車をケーブルに搭載して行うため、測定のみでの作業を行うのではなく、他の作業を行う時期に合わせて行うようマニュアルを定めた。

3.6 近接点検の義務化への対応

平成 26 年に道路法施行令が改正され、橋は最低 5 年に 1 回以上の頻度で、全部材に近接又はそれに代わる方法で点検を行うことが義務化された。しかし、明石海峡大橋は、橋長約 4km、主塔高さ約 300m、主塔基礎深さ約 60m の巨大構造物であり、全部材に近接することは容易ではなく、全部材に対し近接困難箇所の点検方法を案出し、それに代わる方法が妥当であるか試行しているところである。なお、補剛桁には、当初から点検補修用作業車が桁外面用 3 基、桁内面用 1 基が設置されており、約 80% の部分に近接できるが、これに更に付加足場を取り付け、近接率をあげる改造を行っている。近接に代わる点検方法については、部材ごとに劣化プロセスを考慮しその劣化度合いが判定できる点検方法を決定することとなる。このひとつの例として、先に述べた主塔点検用ロボットがあたる。



写真-1 桁外面作業車の付加足場

Photo 1 Additional scaffold on telescopic scaffold of inspection vehicle

4. おわりに

明石海峡大橋の建設では、約 10 年間の工事期間で死亡災害 0 という大規模プロジェクトとして例を見ない偉業を達成した。維持管理段階も、更に継続中であり、今後 200 年以上の維持管理においても、安全第一、利用者第一の予防保全管理に努めたい。そのためには、点検、診断、補修、評価のサイクルを回しアセットマネジメントを継続させること、そのベースとなる維持管理記録を残し、技術継承に努めることを担当者が理解し継続していくことが最も重要である。

瀬戸大橋の維持管理

Maintenance of Seto-Ohashi Bridges

坂出管理センター所長 福永 勸

Susumu Fukunaga

1. はじめに

瀬戸大橋（以下「本橋」という。）は、瀬戸中央自動車道とJR瀬戸大橋線からなる道路鉄道併用橋であり、本州と四国間の海峡部9.4kmを結ぶ6つの海峡部長大橋と島しょ部高架橋からなる。本橋は、昭和63年4月に供用を開始し、平成30年4月に供用30周年を迎える。橋上交通量については、供用開始当時は日平均約1万1千台であったが、平成21年度には2万台を超え、平成28年度は約2万2千台まで増加した。

本州四国連絡高速道路(株)では、海峡部の長大橋を200年以上の長期にわたり利用して頂けるよう、供用開始の初期段階から、予防保全を基本として、計画的な維持管理に取り組んでいる。そして、この取組をより一層体系的なものにするために、アセットマネジメントの考え方を導入し、構造物の長寿命化とライフサイクルコストの最小化に努めている。以下に、これまでに実施した主な維持管理の概要を述べる。



写真-1 瀬戸大橋（番の州側から岡山側を望む）

Photo 1 Seto-Ohashi Bridges (from Bannosu)

2. 点検

平成26年施行の省令に基づく点検は、1巡目の点検が平成30年度までに完了するように計画している。点検は計画どおりに進んでおり、現時点で高速道路の供用や構造物の耐久性に影響するような重大な変状は確認されていない。

海峡部長大橋の延長は約7.1kmで、その上路は死荷重軽減のため鋼床版構造を採用している。鋼床版デッキプレートとUリブ溶接部で発生するビード進展亀裂に対する疲労点検は、赤外線サーモグラフィを用いた「温度ギャップ検出法」により、非接触で塗膜を剥ぐことなく実施している。このシステムは、神戸大学との産学連携協定に基づき、阪上教授の指導の下で疲労点検を実施する(株)ブリッジエンジニアリングと共同で開発したもので、取得した温度データから疲労亀裂が疑われる箇所を

自動的に判別できるプログラムにより、点検を効率化している。

島しょ部高架橋の延長は約2.3kmで、その上路はコンクリート箱桁構造を採用している。その下面の近接目視点検は、1日約150本の列車が運行している鉄道の送電を夜間に停止して、軌陸車や橋梁点検車等を用いて短時間に行う必要がある。このため、あらかじめ高解像度カメラや赤外線カメラを用いて重点点検箇所を確認することで、点検の効率化に努めている。

3. 鋼構造物の防せい対策

海峡部長大橋は、海上の厳しい腐食環境にあるため、建設時はポリウレタン樹脂塗料を上塗りとする重防食塗装仕様を採用している。総塗装面積は、約180万 m^2 に達し、平成18年度より本格的な全面塗替塗装に着手し、平成38年度の完成を目指しており、おおむね6割を完了したところである。当初の塗替塗装においては、明石海峡大橋等で採用したたふっ素樹脂塗料を上塗りに使用していたが、平成23年度からはより耐久性のある高耐久性たふっ素樹脂塗料に変更した。

平成28年度より、塔の塗替塗装に本格的に着手し、櫃石島橋の2P塔から施工を開始した。塗替塗装は、塔作業車、仮設ゴンドラ、杵組足場などを組み合わせて行っており、塔柱の外側は塔作業車を、塔柱の内側は仮設ゴンドラを、塔の桁下等は杵組足場を使用している。橋上の通行車両の安全確保のために、仮設ゴンドラの発着基地を兼ねた路面防護工を設置しており、その設置や移設は、深夜に道路交通を一時通行止めして行っている。

吊橋ケーブルの防食においては、平成14年度よりケーブル送気システムを本格稼働させた。ケーブルの健全度は、ケーブル内の相対湿度をモニタリングすることで確認してきたが、排気口付近において湿度が比較的高いという課題があった。このため、平成17年度より1橋・ケーブル当たりの送気箇所を当初の3か所から6か所に倍増させると共に、プレクーラーを新たに設置する等の改善を行った。また、アンカレイジスプレー室内の除湿については、大体積のスプレー室の縮小化と漏水が直接ストランドに当たらないようにテント設置を行い、テント内湿度環境の改善のためにファンの増設を行った。現在は、ケーブルバンドのシール部の補修を進めており、引き続きケーブル表面の気密化や、ケーブル内湿度を監視するためのモニタリング設備の更新を行う予定としている。

海峡部長大橋においては、管理路等の橋梁付属物の多

くで、溶融亜鉛めっきによる防食方法を採用しているが、経年劣化による変状の発生や進展が顕著になっている。このため、総延長14.8kmの管理路について、外観目視調査による劣化度評価に基づき、平成24年度より計画的に補修を進めている。補修は、劣化度が大きな手すりやグレーチングは再めっきにより、劣化度の小さな桁等は補修塗装により行っている。再めっきは、従来の溶融亜鉛めっきより長期の耐久性が期待できる溶融亜鉛-アルミニウム-マグネシウム合金めっきとしている。

4. コンクリート構造物に対する対応

海上のマスコンクリート構造物である南北備讃瀬戸大橋の4Aや7Aアンカレイジのオーバーハング部において、ポップアウト、表面剥離やひび割れ等の変状を確認した。外観調査及び室内試験の結果、変状の原因は、海水の化学侵食、アルカリ骨材反応、乾湿繰り返しによる複合劣化と判断された。このため、海塩粒子等の侵入を抑制するため、鉄筋位置で100年後の塩化物イオン濃度が 1.2kg/m^3 を超えると予測される範囲で、アクリルゴム系塗料による表面保護工による対策を行った。

島しょ部に位置する櫃石島高架橋等は、上路の道路桁と橋脚の受梁が剛結構造となっている。この受梁には、アルカリ量の多い早強セメントが使用されており、雨水にさらされた部位で、亀甲状のひび割れ等のアルカリ骨材反応の特徴を有する変状を確認した。詳細調査の結果、変状の原因は進行速度の遅いアルカリ骨材反応と考えられた。このため、劣化の進行を抑制するために、予防保全の観点からひび割れ補修及び表面処理による対策を行っている。表面処理は、橋脚天端では水の供給が多いことから遮水系表面保護工を、橋脚側面は内部の水を蒸発させるため撥水系表面保護工を適用している。

5. 鋼構造物の疲労

本橋は道路鉄道併用橋であることから、列車荷重が作用する構造部材は、設計で疲労を考慮している。また、部材製作時には、溶接部に生じた欠陥等は許容値より小さいことを確認すると共に、その位置と大きさを全て記録し、供用後も変化のないことを確認している。このため、現在のところ、主要な構造部材には疲労上の問題は発生していない。

一方、道路橋として設計された部位は、設計当時に疲労設計の概念が十分に導入されていなかったために、当時の一般橋と同様な構造となっている。このため、一部の構造的に弱点となる部位において、疲労亀裂を確認している。斜張橋の櫃石島橋や岩黒島橋において、鋼床版縦桁の垂直補剛材で確認した疲労亀裂については、補修方法の検討が完了したことから、計画的に補修を行っている。

6. 大規模地震に対する対応

本橋の耐震設計は、兵庫県南部地震以前の基準を適用

したため、レベル2地震動を考慮していない。このため、「本四耐震補強検討委員会（委員長：家村京都大学名誉教授）」での検討に基づいて耐震補強設計を行った。設計地震動は、東南海・南海地震、中央構造線（鳴門-石鎚断層）、伏在断層（横ずれ、逆断層）の3タイプの地震を対象として、断層モデルにより設定した。耐震性能照査においては、列車荷重は単線載荷（満載）で考慮し、要求耐震性能は道路橋示方書の耐震性能2とした。耐震補強工事は平成26年度から開始し、これまでに全ての補強工事の契約が完了しており、平成32年度に完了する予定である。また、児島ICから坂出北IC間の陸上部の橋梁についても、順次補強工事に着手する予定である。

鋼橋では、ダンパー設置による減衰性能の向上、トラス桁支承や道路桁支承の交換によるトラス桁の免震化の他、トラス部材への補剛材設置による座屈耐力補強、道路桁支承部の支承補完構造の設置による耐力補強等を行っている。コンクリート高架橋では、繊維シート巻き立て等による橋脚の耐力補強、道路桁支承部の支承補完構造の設置による耐力補強等を行っている。

本橋は、南海トラフ地震の発生時には、四国支援のための緊急輸送路として機能することが求められているが、応急措置が必要な損傷を被る可能性もある。このため、大規模地震後の迅速な道路啓開を行うために、関係機関との連携強化を進めると共に、実践を想定した防災訓練を行っていくこととしている。また、大規模地震後の橋体の安全性を早期に把握するため、耐震設計上の地盤での地震観測と南備讃瀬戸大橋を代表橋梁とした橋体の動態観測を今後も継続していく予定である。

7. おわりに

200年以上の長期という目途からすれば、維持管理はまだスタートを切って間もない状況である。しかし、橋の劣化は本格的な対処が必要な段階となっている。このため、上記で述べた維持管理を着実に進めていくと共に、以下に示す維持管理上の課題の検討や各種保全更新工事等についても、保全レベルの更なる向上のために進める必要があると考えている。

- ・近接困難箇所等の点検に対する新たな近接手段の開発
- ・塗替塗装作業の軽減に寄与する省工程型塗料の適用
- ・JR線上のコンクリート箱桁構造に対する表面保護工
- ・道路面からJR営業線への落下物の防止のために吊橋鋼床版のグレーチングの閉塞
- ・船舶緩衝工を考慮した海中基礎の効率的な防食
- ・鋼橋維持管理用の各種点検補修用作業車の保全
- ・海峡部道路照明や電力設備の老朽化に伴う更新整備

先般、本橋は、吊橋技術のシンボルとして「日本の20世紀遺産20選」の一つに選定されており、その社会的価値も高く評価されたと考えられる。今後もこの貴重な社会資本を健全な状態に維持管理し、次世代に引き継ぐことで、常時の本四間の交流に役立てると共に非常時の緊急輸送路としても役立てていきたい。

本四連絡橋の塗替塗装に関する取組

Recoating for the Honshu-Shikoku Bridges

久米 昌夫 Masao Kume

長大橋技術センター
防食・耐風グループサブリーダー

竹口 昌弘 Masahiro Takeguchi

長大橋技術センター
防食・耐風グループリーダー

概要

本州四国連絡高速道路の海峡部長大橋の外面塗装には重防食塗装系を採用し、その面積は約400万 m^2 と膨大である。重防食塗装系を採用した海峡部橋梁の塗替塗装のコスト縮減には、塗替サイクルの長期化が必要であり、より耐久性が期待できる塗装材料あるいは塗装仕様の開発が求められている。また、塗替塗装は、塗膜消耗に着目した劣化予測により上塗り及び中塗りを適時に塗り替える予防保全を基本としており、それを適切に実施するために塗膜の劣化予測精度の向上が求められている。

本稿では、塗替塗装コストの縮減と塗膜の劣化予測精度の向上に向けた取組として、重防食塗装のさらなる高耐久化及び省工程型塗料の開発、塗膜消耗に対する劣化予測精度の向上及び塗膜剥離に対する劣化予測の検討成果を報告する。

Heavy-duty coating system has been applied to the steel members of the Honshu-Shikoku Bridges and the area to be repainted is approximately 4 million m^2 . In order to reduce repainting cost for the bridges, the extension of recoating cycle is essential and the development of much durable materials or specifications is required. And to conduct efficient recoating based on preventive maintenance strategy in that only top and middle coats are repainted according to the prediction of paint film consumption, improvement of prediction precision is required.

In this paper, improvement of durability of heavy-duty coating system and development of thick film paint system in that recoating cost and period are reduced are reported for the cost reduction for recoating. Also, improvement of film consumption prediction and study for the prediction of peel-off of paint film are explained.

1. はじめに

本州四国連絡高速道路の海峡部長大橋（以下「本四連絡橋」という。）の外面塗装の面積は約400万 m^2 と膨大であり、維持管理に占める塗替塗装の比率は非常に大きく、本四連絡橋のライフサイクルコストを最小化するには、塗替塗装のコスト縮減が最も重要である。このため、本四連絡橋では、建設時より確実な防食性能の確保と長期の耐久性に着目して、下地に犠牲防食機能を有する無機ジンクリッチペイント（以下「無機ジンク」という。）を用い、上塗りには耐候性に優れる塗料を用いる新しい塗装仕様（重防食塗装系）を開発、採用してきた（図-1）。そして、その塗替では無機ジンクの現場での施工が高価であり、しかも施工時の品質管理が難しいことから無機ジンク層の劣化を許容しないこととし、無機ジンクの保護層である下塗り層の露出が生じる前に中

塗りと上塗りを塗り替えることを基本としている。

重防食塗装系の劣化は、図-2に示すように(1)塗装面の光沢度の低下、(2)樹脂成分の劣化に伴う白亜化の進行、(3)上塗り、中塗り、下塗りの膜厚消耗の順に進展することが一般的に言われている¹⁾。

現在、塗替塗装の施工時期は、塗膜消耗に着目した劣化予測より設定している。このため、施工時期の異なる本四連絡橋の膨大な塗替塗装を確実かつ効率的に計画、実施する上で、塗膜の劣化予測の精度向上が必要となる。

本稿では、塗替塗装のコスト縮減に向けた取組として、塗替サイクルの長期化を目指した重防食塗装のさらなる高耐久化と省工程型塗料の開発について報告する。さらに、塗替時期の設定に必要な塗膜の劣化予測に関する取組として、これまでに蓄積された塗膜の消耗やはがれなどのデータを活用した劣化予測の高度化に関する検討について報告する。

上塗:ふっ素(ポリウレタン)樹脂塗料(25μm)	優れた耐候性(劣化しにくい)	塗替
中塗:エポキシ樹脂塗料(30μm)	上塗りと中塗りの接着剤の役割	
下塗:エポキシ樹脂塗料(120μm)	耐水性等により犠牲防食層を保護	
犠牲防食層: 無機ジンクリッチペイント(75μm)	電気的な防食作用による優れた防食性	
鋼材		

図-1 重防食塗装仕様
Fig.1 Heavy-duty coating

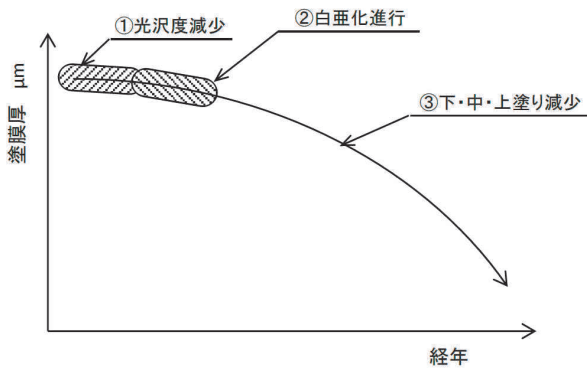


図-2 塗膜劣化モデル
Fig.2 Model of coating deterioration

2. 塗替コスト縮減に向けた取組

2.1 重防食塗装のさらなる高耐久化^{2)~5)}

上塗り塗料には、耐候性に優れた材料を用いており、大三島橋を除く明石海峡大橋より前に建設された橋梁にはポリウレタン樹脂塗料を用いている。明石海峡大橋以降はポリウレタン樹脂塗料よりも耐候性に優れたふっ素樹脂塗料を採用し、また塗替塗装においても標準仕様として採用している。そして、現在は従来型のふっ素樹脂塗料より更に耐候性に優れた高耐久性ふっ素樹脂塗料を開発し、瀬戸大橋の塗替塗装に採用している。

以下に、高耐久性ふっ素樹脂塗料について、開発経緯と瀬戸大橋の塗替塗装の定点調査による耐久性の検証結果を示す。

(1) 高耐久性ふっ素塗料の開発経緯

大鳴門橋の取付け高架橋において11年を経過したふっ素樹脂塗料の光沢度の低下が確認された。これは、本四連絡橋の色調が無彩色のライトグレーであり、上塗りのベースとなる白塗料に含まれる白色の酸化チタン顔料が、光(紫外線)と水による光触媒作用によって樹脂分解を生じさせ塗膜の劣化が生じたものと考えられた。この劣化を防ぐため、現行の塗色を前提として、酸化チタン表面の高密度化を図るなどの改良により「高耐久性ふっ素樹脂塗料」を開発し、同時に「高耐久性ふっ素樹脂塗料上塗(暫定)規格」を制定(2010年)し、2011年度より瀬戸大橋の塗替塗装の上塗り塗料として採用している。

高耐久性ふっ素樹脂塗料の耐久性能は、塗膜の劣化が

塗膜消耗までの進行に長時間を要するため、塗膜の劣化で最初に現れる光沢度の低下に着目し、光沢保持率(初期の光沢度と残存する光沢度の比率)により評価することとした。

耐久性能の評価は、室内促進耐候性試験及び屋外暴露試験を実施したが、これらの相関性が低かったため、屋外暴露試験の結果を用いるのが実用的で信頼性が高いと判断した。(財)日本ウエザリングテストセンター宮古島(以下「宮古島」という。)での屋外暴露試験結果では、光沢保持率は1年程度では低下が見られず、2年経過ごろから急激に低下し、3年経過時点において50%程度となる(図-3)。これらの試験結果より、塗料規格で求める耐久性能は、宮古島での光沢保持率が暴露期間3年で50%以上とした。

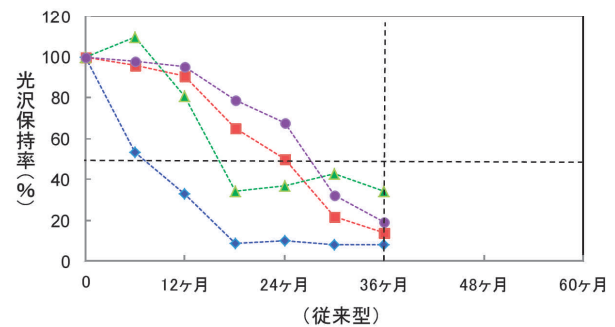
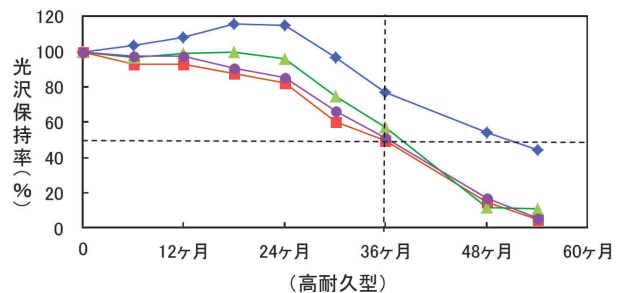


図-3 光沢保持率(宮古島暴露試験結果)
Fig.3 Rate of gloss retention at Miyako Island

(2) 実橋における長期耐久性の検証

実橋における高耐久性ふっ素樹脂塗料の長期耐久性を検証することを目的として、櫃石島橋に塗膜調査用の定点を設け、光沢保持率等の変化を追跡調査している(図-4)。

定点設置から約4年経過後(2015年10月)に光沢度などの調査を行った。図-5に高耐久性ふっ素樹脂塗料の光沢保持率の調査結果を示す。ここでは、同じ櫃石島橋で塗替塗装された従来型ふっ素樹脂塗料の光沢保持率と比較して示している。高耐久性ふっ素樹脂塗料の光沢度は調査面の向きによる差異が見られ、特に紫外線の影響を強く受ける上弦材の上面での低下が相対的に大きくなっている。高耐久性ふっ素樹脂塗料と従来型ふっ素樹脂塗料との比較では、高耐久性ふっ素樹脂塗料の方が高い光沢保持率を維持している。なお、目視による調査では、両者とも、塗膜のふくれ、はがれ、割れ等の変状は確認されていない。

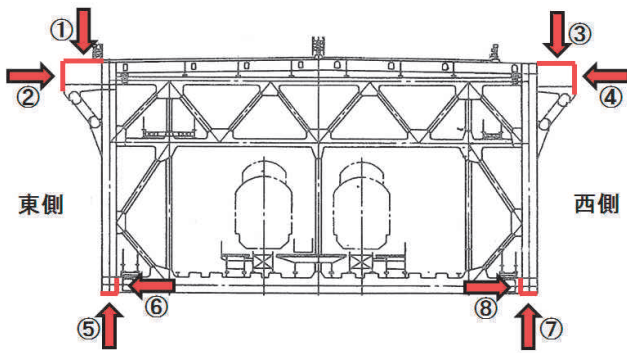


図-4 塗膜調査用定点位置 (櫃石島橋)
Fig.4 Fixed measure point at Histuishi Jima Bridge

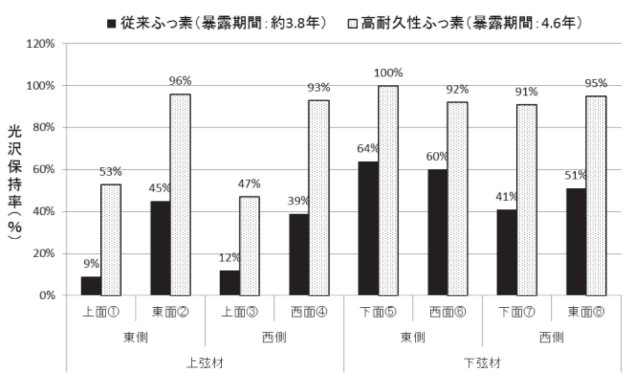


図-5 光沢保持率の比較
Fig.5 Comparison of rate of gloss retention

2.2 省工程型塗料の開発⁶⁾

(1)概要

塗替塗装は、上塗り・中塗りの2層の塗替えを基本としているが、2層塗りの施工には塗り手間が掛かること、塗膜乾燥のために塗り間隔の確保が必要となることなどの改善の余地がある。中塗り層は、耐候性の高い上塗り層と下塗り層との付着性を高める接着剤の役割が主であり、それ自体の耐候性は低い材料である。これまでの塗膜消耗に着目した調査によると、中塗り層は上塗り層の約10倍の消耗速度を有しており、中塗り層が露出すると、早期に塗膜の消耗が進行し、下塗りの露出が生じることとなる。そこで、中塗りと上塗りを兼用できる塗料により1層で施工することによる塗り手間の省力化を可能とする塗料の開発を行っている(表-1)。この省工程型塗料によって、耐候性の高い塗料のみで厚い膜厚の施工が可能となれば、塗替サイクルの長期化による本四連絡橋のLCC縮減が期待できる。

後述する2013年の大規模試験施工時の実績を表-2に整理する。それによると、従来の2層塗りの上塗りと同程度の塗り手間で省工程型塗料の施工が可能であり、中塗り作業分の省力化が期待できる。また、省工程型塗料

は有機系塗料ではあるが厚膜性を確保するために溶剤量が少ない設計となっている。溶剤等に含まれる揮発性有機化合物(VOC)が健康被害を及ぼす恐れがあり、省工程型塗料はVOC削減につながる環境に配慮した塗料でもある。

以下に、現地試験施工及び暴露試験による省工程型塗料の規格化に向けた取組を示す。

表-1 省工程塗料塗装仕様

Table 1 Thick film paint

仕様	素地調整	第1層	第2層	備考
現行仕様	4種	エポキシ樹脂塗料中塗(30)	ふっ素樹脂塗料上塗(25)	はけ塗り
省工程型塗料	4種	省工程型塗料(55)		ローラー塗り

※ ()内の数字は基準とする乾燥塗膜厚(μm)

表-2 省工程塗料施工実績

Table 2 Results of painting works

仕様	施工範囲	労務編成	実働日数
現行仕様の上塗り〔はけ〕	P47~P49 P54~P57 (7パネル)	橋梁塗装工 7人	1.3日/パネル
省工程〔ローラー〕	P43~P46 (4パネル)	橋梁塗装工 7人	1.2日/パネル

(2)現地試験施工

2012年より実橋への適用性を確認するため省工程型塗料の試験塗装を開始した。2012年は南備讃瀬戸大橋で小規模の範囲において施工性等(厚塗り性、仕上がり性、付着性)の確認を行った。その結果、塗膜厚の確保がやや難しいが、塗装道具の改良や施工速度の調整等によって克服できるものであった。その他は、特段の課題となるようなことはなく、それらを踏まえて2013年に岩黒橋で大規模な施工試験を行い、施工性や塗装の仕上がり具合等の確認し、おおむね良好であることを確認した。写真-1に2013年の大規模試験施工時の状況を示す。施工は、ローラー塗りを基本として、角部やスカラップ部等は、刷毛による先行塗装を施している。



写真-1 省工程塗料試験施工状況

Photo 1 Testing works

耐候性及び付着性については、長期性能の確認が必要なため、追跡調査用の定点を設置している。図-6に試験施工3年後の光沢保持率の結果を示す。実橋追跡調査では、省工程型塗料2社の塗料で、光沢度が低下していない。表-3に試験施工5年後までの付着力試験（JIS K 5600プルオフ法）の結果を示す。省工程型塗料は、従来の中塗りを省略することから旧塗膜との付着性の確保が課題の一つと考えていたが、所要の付着力を有していることが確認できた。

(3) 暴露試験結果

宮古島屋外暴露試験を継続し、長期的な耐候性を確認中である。図-7に宮古島屋外暴露での光沢度の低下を示す。継続調査中の省工程型塗料には、高耐久性ふっ素樹脂塗料（図-3）と同等の光沢保持性能を有する材料が存在すること、また、従来型のふっ素樹脂塗料（図-3）との比較では、おおむね同程度の光沢保持性能は有

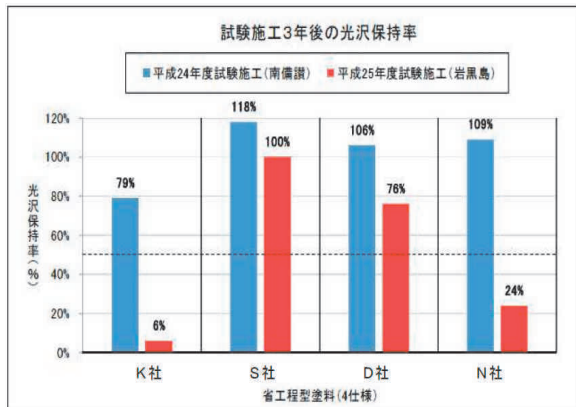


図-6 試験施工3年後の光沢保持率

Fig.6 Rate of gloss retention after 3 years from testing works

表-3 付着力試験結果（南備讃瀬戸大橋）

Table 3 Results of adhesion stress at Minami Bisan-Seto Bridge

(単位: N/mm²)

素地調整	塗料メーカー	初期値 (H24.9)	2回目 (H25.6)	3回目 (H27.9)	4回目 (H29.9)
4種	A社	5.4	6.0	6.0	6.0
	B社	5.4	6.0	5.7	6.0
	C社	6.0	6.0	6.0	6.0
	D社	5.9	6.0	5.4	5.3
ウェス拭き	A社	5.8	6.0	6.0	6.0
	B社	6.0	6.0	6.0	6.0
	C社	5.7	6.0	6.0	6.0
	D社	5.3	6.0	4.5	4.7

※「6.0N/mm²以上」の場合は、「6.0N/mm²」と示す。

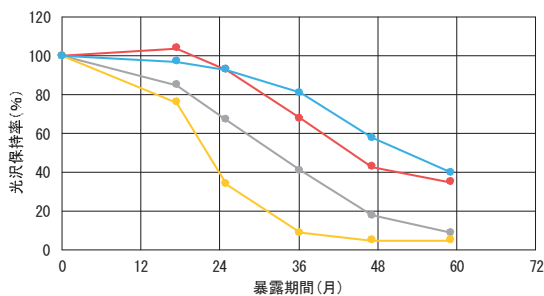


図-7 光沢保持率（宮古島暴露試験結果）

Fig.7 Rate of gloss retention at Miyako Island

していることが確認できた。

(4) 塗料規格化に向けた課題

省工程型塗料の施工品質及び施工性は概ね良好であり、省力化によるコスト縮減効果が期待できることを確認した。また、試験施工から5年後の耐候性と旧塗膜との付着性も概ね問題ないことが確認できた。ただし、塗膜の消耗特性の評価には、長期的な継続調査が必要である。

今後、耐久性の評価手法（指標、規格値）などを検討した上で省工程塗料の規格化を図る予定である。

2.3 上塗り塗料の長期消耗特性

高耐久性ふっ素樹脂塗料の耐候性は、塗膜劣化で最初に現れる光沢度の低下（光沢保持率）で規定している。しかしながら、光沢保持率と長期的な塗膜の消耗特性の関係は必ずしも明らかにされていないのが現状である。図-8に従来型ふっ素樹脂塗料と高耐久性ふっ素樹脂塗料の宮古島屋外暴露での光沢保持率と光沢保持率低下後の消耗量の調査結果を示す。

塗膜厚の消耗開始時期は必ずしも明確ではないが、各塗料とも光沢保持率がおおむね下限値になってから塗膜厚の消耗が開始している傾向にある。また、高耐久性ふっ素樹脂塗料は、従来型ふっ素樹脂塗料に比べ光沢保持期間が長く、塗膜厚の消耗開始時期は概ね暴露期間4年以降と従来型ふっ素樹脂塗料に比べ遅くなっている。なお、塗膜厚の消耗特性については、ばらつきが大きく、今後も継続調査を行い評価する必要がある。

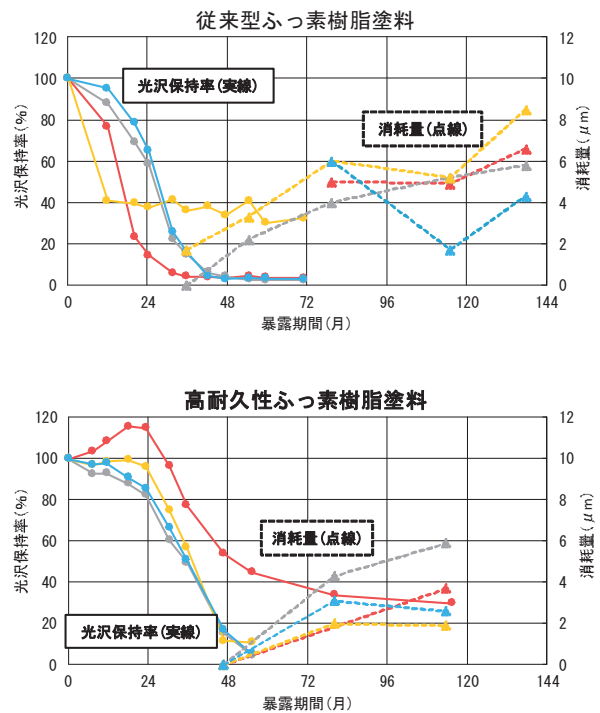


図-8 光沢保持率と消耗量（宮古島暴露試験結果）

Fig.8 Rate of gloss retention and paint film thickness reduction at Miyako Island

3. 劣化予測の精度向上に向けた取組

3.1 概要

塗膜消耗予測のイメージを図-9に示す。重防食塗装系を採用した橋梁はこれまでに因島大橋、大鳴門橋の塗替えが完了し、現在瀬戸大橋の塗替えを実施しているが、この間に塗膜消耗量の計測方法の変更、見直しや上塗り塗料の性能向上があった。塗膜消耗速度を見積もるための消耗量の計測は、初期は暴露試験片の消耗データに基づいていたが、最近では実橋の塗膜を電磁膜厚計、顕微鏡観察による計測へと変わった。耐候性を期待した上塗り塗料の材質は、工場塗装ではポリウレタン樹脂からふっ素樹脂へ、塗替塗装ではふっ素樹脂から高耐久性ふっ素樹脂へと更新している。計測手法の見直しにより上塗りの耐候性能が高く消耗速度が小さいことが判り、上塗り材料の見直しにより更に長い寿命が期待できる。

塗膜消耗予測する際、消耗期間は膜厚を予測消耗速度で除して求めることから、塗膜寿命は消耗速度と反比例の関係にある。図-10は、設計膜厚に対し、見積もる消耗速度と上塗り消耗期間の予測値との関係を示したものであり、消耗速度はこれまでに見積もられた、あるいは推測される範囲を示している。上塗りの消耗速度が小さく見積もられるほど寿命は急激に伸びるため、塗替えに複数年を要する長大橋の適切な塗替実施時期の設定には予測の精度向上が求められることになる。

消耗予測に影響するものに残存膜厚もある。塗膜厚はばらつきがあり、塗替え実施の判定は上塗り塗膜の薄い部分の消耗の進展状態で決まると考えられることから、上塗りの膜厚特性を精度良く把握する必要がある。

消耗予測が危険側の結果となるリスクを避けるためには、データの十分な計測精度、統計処理をして十分な信頼度が得られるだけの調査数、データの処理方法（消耗速度及び残存膜厚のばらつきの処理）、寿命（限界状態）の設定について妥当性等をチェックする必要がある。このため、実橋の塗膜消耗の進展を確認して予測の妥当性を検証する必要がある。

また、上塗りの耐候性能が向上すれば、消耗以外の塗膜劣化が塗膜寿命を決める可能性が生じるため、他の劣化要因についても分析や劣化予測を行うためのデータ収集を進める必要がある。これにより寿命が決まる恐れがあるのは、これまでの変状を見ると無機ジンク及び中塗りの劣化による塗膜剥離である。無機ジンクからの塗替えは長期計画で想定していないが、劣化が全面塗替えを必要とするまでには進展しないということが検証されていないことから、劣化の評価や予測方法の検討が必要と考えている。中塗りの劣化については、上塗りが残存している状態で中塗りの劣化が進行しているケースが確認されており、上塗りの耐候性が向上し、その消耗期間が長期化すると、耐久性の高い上塗りが消耗過程の途中で寿命を全うせずに剥離する可能性が考えられることから、中塗り塗膜の耐久性に対しても同様な準備が必要である。

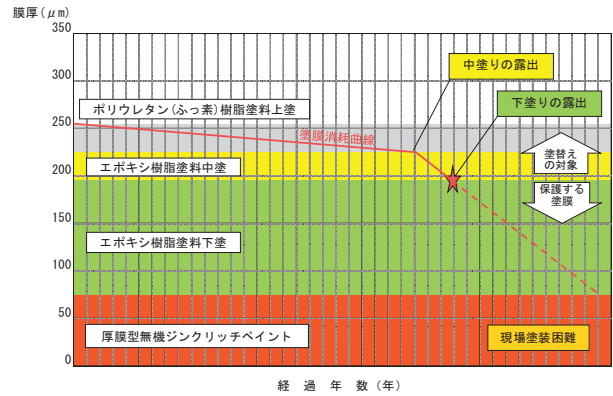


図-9 塗膜消耗予測のイメージ

Fig.9 Concept of coating degradation prediction

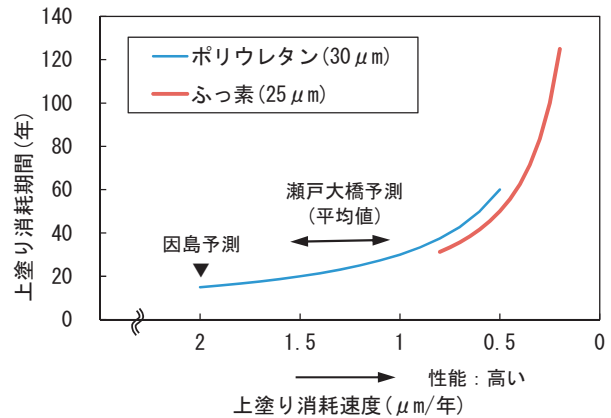


図-10 塗膜消失期間と消耗速度の関係

Fig.10 Relation between paint film disappearance period and rate of paint film thickness reduction

以下に、塗膜消耗に対する劣化予測精度の向上と、塗膜剥離に対する劣化予測についてのこれまでの検討結果を示す。

3.2 塗膜消耗に対する劣化予測精度の向上^{7), 8)}

塗膜消耗予測の精度向上に影響するのが消耗速度と残存膜厚であり、これらの推計の精度の向上が最初の取組となる。また、得られたデータの代表値を用いるかばらつきを考慮するかによっても予測結果に差が生じるため、適切な処理方法の検討を行っている。

(1) 残存膜厚、塗膜消耗速度のばらつきを考慮した劣化予測手法

実橋における塗膜厚の分布を調査した結果、図-11に示すようなばらつきが認められ、対数正規分布関数で近似できることが明らかとなった。

また、塗膜消耗速度は正規分布で近似できることからこれらの確率分布を使用したモンテカルロシミュレーションを実施することにより、塗替塗装完了時期を精度良く予測する手法を開発した。開発した手法のイメージは図-12に示すとおりであり、無機ジンクリッチペイントの露出が生じない限界状態となる時期を確率的に求めるものである。

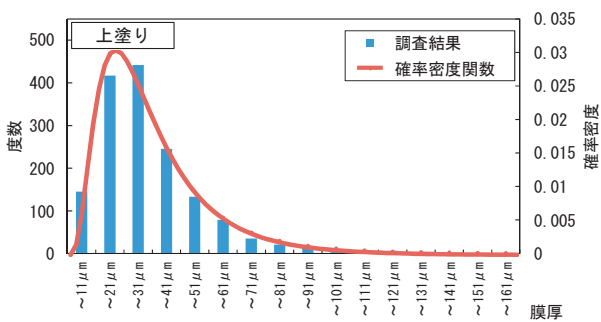


図-11 上塗り残存塗膜厚の分布 (瀬戸大橋)
Fig.11 Distribution of remaining coating thickness (Seto-Ohashi Bridges).

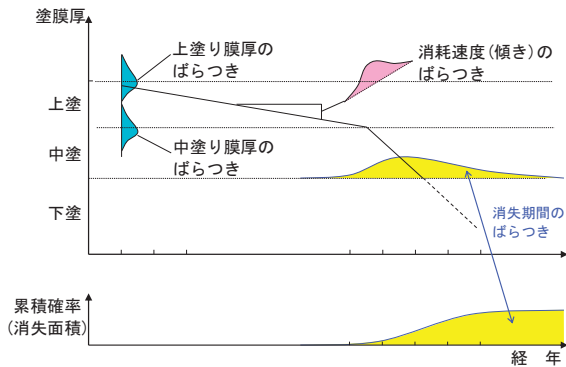


図-12 塗膜劣化予測のイメージ
Fig.12 Concept of coating degradation prediction

(2) 現地塗膜データの蓄積

既往の劣化予測に用いられたデータ数は十分でなく、検討した結果、1橋当たりの必要調査箇所数として、消耗速度を求めるための消耗量を30点程度以上、残存膜厚を300点程度以上とすれば80%以上の信頼度が得られることが明らかとなった。これを受けて消耗速度の調査については、2013年度から不足する調査点数分の調査箇所を設置した。

ポリウレタン樹脂塗料については、本四連絡橋においてこれまでに多くのデータが蓄積され、消耗特性についての評価も進んだが、まだ健全な状態にあるふっ素樹脂塗料についてはデータがほとんど集まっていないため、ポリウレタン樹脂塗料と同様なデータを蓄積していく必要がある。

2016年4月に「定点塗膜調査」要領を「塗膜詳細調査」要領に改訂し、統計データに基づく消耗予測を行うために必要な調査事項を規定した。残存膜厚調査を追加し、各調査項目の目的(必要性)を記述している。消耗量の計測方法を見直すとともに消耗量計測用定点の形状を変更した。ふっ素樹脂塗料の光沢度低下期間を想定し、調査頻度を見直している。

3.3 塗膜剥離に対する劣化予測

塗替えサイクルの長期化を図るためには塗膜剥離対策を検討し、塗装系全体の性能のバランスを把握していく必要がある。

本四連絡橋の外表面塗装において、剥離による変状面積は大きくはないが、剥離の多くは上塗りと中塗りの層間剥離と無機ジンクの劣化を伴う内部剥離が多くを占める。無機ジンクの剥離は鋼床版裏面で比較的に多く見られ、その要因としてグース舗設時等の熱影響が推定された。なお、この現象は今のところ急激な進展は見られない。

一方で、一部の構造で顕著に生じている塗膜の変状がある。明石海峡大橋2P主塔における塗膜剥離(写真-2参照)及び無機ジンクの劣化、来島海峡第二大橋補剛桁下面の上塗り塗膜の剥離、ふくれ、しわ等の変状(写真-3参照)である。



写真-2 明石海峡大橋主塔の塗膜剥離
Photo 2 Coating peeling at main tower of Akashi Kaikyo Bridge



写真-3 来島海峡第二大橋の塗膜剥離
Photo 3 Coating peeling at girder of 2nd Kurushima Kaikyo Bridge

以下に、上塗り剥離と無機ジンク剥離に関するこれまでの検討結果を示す。

(1) 上塗り剥離(中塗り劣化)の要因分析の現状^{9), 10)}

上塗塗料の性能向上に伴い、塗膜消耗よりも先に中塗り部からの剥離が生じることがある。その原因を把握するため、実橋塗膜の化学分析、剥離強度分析等を実施した。その結果、以下の事項が明らかとなった。

1) 劣化因子(酸)の浸入による影響分析

上塗りが残存した状態で中塗りのエポキシ樹脂塗料が変色・劣化し、上塗りと中塗りの層間の付着力が低下して上塗りが剥離する現象が確認されている。写真-4はガムテープにより上塗りを強制的に剥離し、露出した中塗りの顕微鏡観察の例であり、当初は白色であった中塗りが黄色に変色していることが確認できる。

本四連絡橋は海上またはその近傍に架橋され、飛来塩分が多い環境にあることから、塩分が中塗りの劣化に影響していることが疑われた。塗膜のEPMA分析により、

塩素原子が中塗り層まで浸透していることが明らかとなっており、これが上塗りと中塗りの層間剥離の要因として考えられた。そこで塩化物由来の劣化因子（塩酸等）による劣化促進塗膜と実橋劣化塗膜を赤外線分光試験（顕微ATR法）により比較し、劣化要因を調査した。その結果、スペクトルは塩酸が作用した塗膜と類似していることが明らかとなった。このことから、中塗り塗膜劣化部は、塗膜表面から浸入した酸により樹脂成分の分解が生じている可能性があると考えられる。

2) 上塗り残存膜厚と上・中剥離強度の関係

SAICAS 試験¹¹⁾ 装置による上塗り塗膜と中塗り塗膜の境界部における剥離強度の計測結果を図-13に示す。剥離強度のばらつき大きい、上塗りの残存膜厚の減少に伴い剥離強度が低下する傾向にある。このことから、上塗り塗膜が薄いほど酸等の浸入による中塗り塗膜の劣化が進行した可能性があると考えられる。

また、上塗り膜厚がある程度薄くなった時点ではがれ落ちている可能性があるため、塗膜の状態確認用定点を設け追跡調査を行っている。発見した中塗り露出は、0.2mm程度の点状の上塗り剥がれであった。写真-5のように中塗り露出部直近の上塗り塗膜は平均11μmであり、標準乾燥膜厚（30μm）より薄くなっていた。また、中塗り露出箇所は、下塗りが盛り上がったため部分的に中塗り・上塗り膜厚が薄くなっていることも確認された。今後も調査を継続し、上塗り塗膜のはがれが発生する限界状態やはがれの進展状況を確認する計画である。

(2) 無機ジंक剥離の要因分析の現状¹²⁾

無機ジंक層内での剥離は、亜鉛粒子の酸化に起因していると予想されてきた。トラス桁等の鋼床版裏面での塗膜剥離が発見されるようになり、2007年には「鋼床版舗装における熱影響は無機ジंकを酸化させる一つの要因と推定される」と整理された。先に述べた明石海峡大橋主塔の塗膜剥離が顕在化してきたことから、熱以外の劣化要因の調査を実施している。

以下に、施工条件の影響、劣化因子の透過に着目した検討結果を示す。

1) 施工条件の影響

施工条件の影響を確認するため、無機ジंक塗付時の湿度、養生時間、暴露環境を変えた暴露試験体を作成し、2004年3月から下津井瀬戸大橋主塔基礎上及び門崎高架橋箱桁内に設置した。これらの試験体について約10年経過時に分析調査、付着力試験を行い、施工条件の良否の影響を確認した。表-4はSEM（走査型電子顕微鏡）による観察及びJIS K5600プルオフ試験の結果である。SEM画像の白い球状のものが亜鉛粒子、粒子中の灰色部分が亜鉛の酸化である。条件不良の試験体が標準条件と比べ酸化度が高い、あるいは付着力が低いという結果はほとんど見られず、施工条件と劣化の関連性は確認できなかった。



写真-4 中塗りの黄変
Photo 4 Yellowing of middle coat

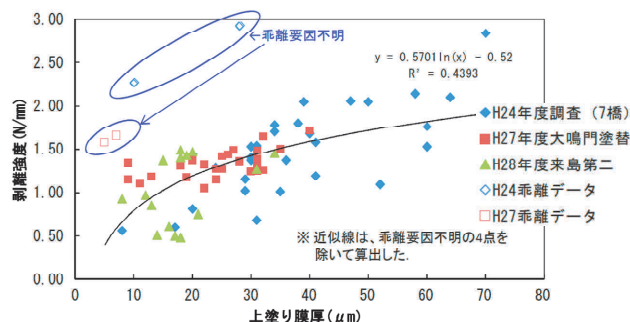


図-13 上塗り塗膜と剥離強度の関係

Fig.13 Relationship between top coating thickness and separation strength

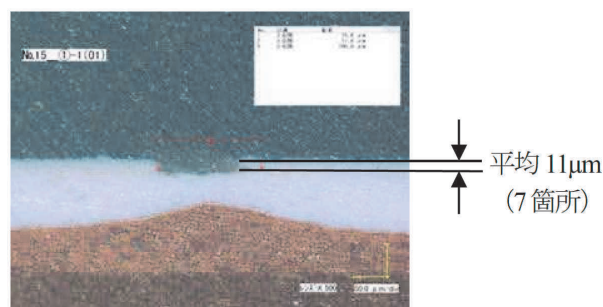


写真-5 断面観察結果

Photo 5 Cross-sectional observation results

2) 劣化因子の透過

亜鉛の酸化度が大きくなると付着強度が低下する傾向にあることがこれまでの調査で明らかになっている。亜鉛が酸化するためには外部から水や酸素が供給される必要があることから、有機塗膜（上塗りから下塗り）の酸素及び水蒸気透過性能の把握を実施した。

上塗り塗膜（ふっ素樹脂）の酸素及び水蒸気の透過性能は、中塗り及び下塗り塗膜（エポキシ樹脂）の5倍以上透過させることが明らかとなった。また、エポキシ樹脂の透過性能は、塗膜厚を増やすことにより透過しにくくなる傾向にあることが明らかとなった（図-14）。現在、塗膜の透過性能の調査に加えて水分保持性能などの調査を実施しているところであり、無機ジंक剥離の要因分析を進めて行く予定である。

表-4 暴露試験結果

Table 4 Results of exposure test

試験体名	ZED-2	ZEN-1	
塗装条件	① 標準	② ジンク低湿度塗付	
試験体 ZED-2	SEM酸化度	酸化度Ⅱ	酸化度Ⅰ
	付着力	1. 0N/mm ²	1. 0N/mm ²
試験体 ZEN-1	塗装条件	① 標準	② 養生時間1/2
	SEM酸化度	酸化度Ⅳ	酸化度Ⅳ~Ⅴ
	付着力	1. 5N/mm ²	1. 0N/mm ²
試験体 ZEK-1	塗装条件	① 標準	② 低湿度塗付 & 養生1/2
	SEM酸化度	酸化度Ⅴ	酸化度Ⅲ
	付着力	1. 6N/mm ²	3. 0N/mm ²

SEMの酸化度判定基準	
I	酸化みとめられない
II	酸化の兆候がある
III	酸化している(Ⅳより軽微)
IV	酸化している
V	酸化及び割れがある

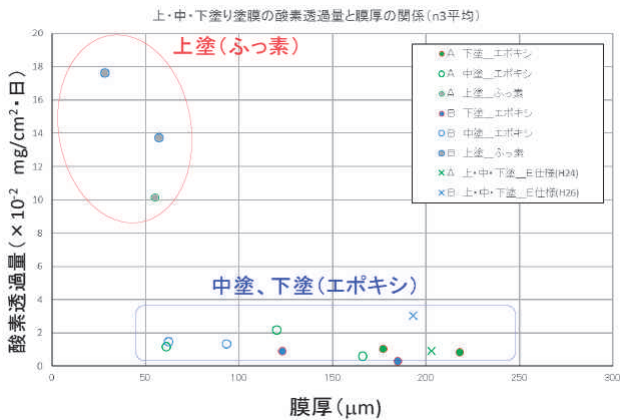


図-14 塗膜厚と酸素透過性能の関係

Fig. 14 Relationship between coating thickness and oxygen permeability performance

4. おわりに

上塗り塗膜の高耐久化、省工程型塗料の開発、塗膜の消耗速度と残存膜厚のばらつきを考慮した塗膜消耗の劣化予測手法の開発を行った。これにより、本四連絡橋の塗替塗装コストの縮減と合理的な塗替計画の策定が期待できる状況にある。なお、一部の橋梁においては限定的

であるが、上塗りと中塗りとの層間剥離や、無機ジンク層の劣化に起因すると思われるはがれ等の変状がある。これらについては、今後も劣化要因の分析と対応の検討を継続し、より確実かつライフサイクルコスト縮減に向けた重防食塗装系の維持管理手法を確立する必要がある。

また、上塗り塗膜の耐久性は、劣化の初期段階で現れる塗膜表面の光沢度の低下により評価しているが、長期的な塗膜の消耗特性との関係は必ずしも明確になっていない。塗膜消耗調査の長期継続により光沢保持率と塗膜消耗速度の関係を検証していくとともに、上塗り塗膜の長期耐久性を評価するための新たな方法・指標の開発も今後の課題であると考え。さらに、上塗り・中塗り・下塗りの有機塗膜が存在しても無機ジンクに対する劣化因子の浸透・浸入により、無機ジンクの酸化等による劣化がゆっくりと進行していくことは否定できない。200年以上という長期の保全期間を考えた場合、無機ジンクの非破壊調査等による効率的な健全度評価手法の確立も今後の課題であると考え。

塗替塗装が保全業務に占める比率が高く、そのコスト縮減には適切な塗膜の評価を踏まえた塗替塗装の施工が必要であるとともに、保全段階で得られた塗膜劣化のデータを的確に分析、評価することにより、今後の塗料の開発や塗替塗装の品質改善へ反映していきたい。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼道路橋塗装・防食便覧資料集、2010.9
- 2) 小林克己：高耐久性ふっ素樹脂塗料（仮称）の開発、本四技報、Vol.30、No.107、pp.2-8、2006.9
- 3) 栗野純孝、矢野賢晃、籠池利弘：高耐久性ふっ素樹脂塗料上塗（暫定）規格の制定、本四技報、Vol.35、No.116、pp.2-7、2011.3
- 4) 大川宗男：高耐久性ふっ素樹脂塗料の開発と適用、防錆管理、Vol.62、pp.17-22、2016.8
- 5) 大川宗男、熊井貴弘：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の確認、土木学会第71回年次学術講演会、2016.9
- 6) 大塚雅裕、蔵森和生：環境に配慮した塗料の開発、本四技報、Vol.38、No.122、pp.2-7、2014.3
- 7) 大塚雅裕、楠原栄樹：重防食塗装の劣化予測の高度化、本四技報、Vol.39、No.124、pp.2-9、2015.3
- 8) 大塚雅裕、楠原栄樹：重防食塗装の劣化予測手法の開発、構造工学論文集、Vol.62A、pp.492-502、2016.3
- 9) 大塚雅裕、楠原栄樹：重防食塗装の剥離要因に関する調査、土木学会第71回年次学術講演会、2016.9
- 10) 久米昌夫、楠原栄樹、町田陽：上塗り剥離要因に関する実橋塗膜調査結果、土木学会第72回年次学術講演会、2017.9
- 11) 西山、高橋：表面一界面切削法、色材、1989
- 12) 荻原勝也、大塚雅裕：無機ジンクリッチペイント劣化に関する調査、本四技報、Vol.39、No.123、pp.43-44、2014.9

本州四国連絡橋における疲労対策

Fatigue prevention method on Honshu-Shikoku Bridges

林 昌弘 Masahiro Hayashi

長大橋技術センター
診断・構造グループリーダー

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

概要

本州四国連絡橋の疲労検討は、道路鉄道併用橋の補剛トラス部材へ適用する調質高張力鋼の疲労設計から始まり、大型疲労試験機による各種疲労試験が実施され、その成果は設計基準及び施工基準等へ反映されてきた。近年、他機関の道路橋において疲労損傷が数多く報告されるようになり、疲労耐久性の向上を目的として様々な検討が実施されている。ここでは、本州四国連絡橋における疲労設計の経緯を簡単に紹介するとともに、現在取り組んでいる疲労対策のうち代表的なものについて述べる。

In Honshu-Shikoku Bridges, the fatigue design were started in the field of the stiffening truss member used for a road and railway combined bridge. Various fatigue tests with the large scale fatigue testing machine were carried out, and the result has been applied to the design criteria and the fabrication standard for long span bridges. Many fatigue damages were recently reported by another road management offices, and many kind of fatigue prevention methods were also reported. This paper describes the development process of the fatigue design on Honshu-Shikoku bridges, and reports the studies that are aimed at ensuring the safety of the structure for fatigue damage.

1. はじめに

本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という。）の疲労設計は、道路鉄道併用橋の補剛トラス部材へ適用する調質高張力鋼の疲労検討から開始された。設計開始当時、調質高張力鋼の鉄道橋への使用実績はわずかであり、疲労に関する知見も限られていたため、実物大試験体による疲労試験を実施するために「大型疲労試験機」が設置され、各種の疲労試験が実施された。その成果は、上部構造設計基準や鋼橋等製作基準の規定に反映され、瀬戸大橋等の長大橋の建設に生かされている。

また道路橋においては、直接自動車荷重を支える鋼床版を除いて、活荷重により発生する応力が比較的小さいことから一般には活荷重による疲労の影響を考慮しなくて良いとされてきた。しかし近年の荷重の大型化や大型車交通量の増加により、種々の疲労損傷が報告されるようになり、疲労が道路橋の耐久性、安全性を脅かす大きな問題となってきたため、2002年の道路橋示方書の改訂より道路橋においても疲労設計が規定されている²⁾。

ここでは、本四連絡橋の疲労検討の経緯について簡単に紹介するとともに、現在取り組んでいる疲労対策のい

くつかについて報告する。これらの対策の詳細については参考文献等を参考にさせていただきたい。

2. 本四連絡橋の疲労設計

2.1 道路鉄道併用橋の疲労設計

吊構造橋梁では死荷重軽減のために調質高張力鋼が使われることが多い。しかし瀬戸大橋の建設当時は鉄道橋への調質高張力鋼の使用実績はわずかで疲労に関する知見は限られたものであった。瀬戸大橋では列車荷重及び自動車荷重が繰り返し載荷されることによる疲労の問題が重要な課題となったため、特に死荷重軽減のため補剛トラスに使用される計画であった HT690 及び HT780 等の調質高張力鋼の疲労強度等に関する調査が行われると同時に、小型試験片を用いた各種溶接継手の疲労試験が実施され、1974年に道路鉄道併用橋の疲労設計の考え方及び高張力鋼の疲労許容応力度がまとめられた。

しかしこれらは小型試験片を用いた試験結果を基に定められたものであったため、実橋部材の評価を行うためには実物大の供試体を用いた疲労試験を行い、疲労強度への影響を把握する必要があった。そこで1974年8月に、静岡県富士市の（社）建設機械化研究所（当時）に

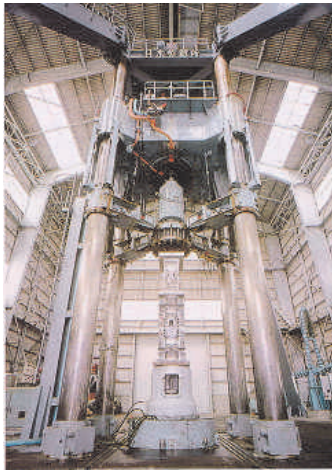


写真-1 大型疲労試験機
Photo 1 Large scale fatigue testing machine

動的最大荷重 4MN の载荷能力を有する大型疲労試験機が製作・設置され、1975 年より本格的に試験が開始された（写真-1）。

この大型試験機を用いて、道路鉄道併用橋を対象とした調質高張力鋼を用いたトラス格点構造及びボックス断面試験体、板材による溶接及びボルトによる基本的な継手の供試体、ケーブル供試体の疲労試験が実施された。これらの成果は上部構造設計基準に定める疲労設計及び鋼橋等製作基準の規定に反映され、瀬戸大橋などの建設に生かされている。

この疲労試験による成果の一例として、トラス弦材のかど溶接部の疲労亀裂対策が挙げられる。この疲労亀裂は、かど溶接部の微小なブローホール等の溶接きず（建設当時は「溶接欠陥」と呼称）を起点として発生・進展し、疲労耐久性を低下させるものである。従来の溶接法では部分溶込み溶接のルート付近にブローホールが多発することが確認されたため、疲労許容応力度の見直し、破壊力学を用いた疲労亀裂進展解析に基づく許容寸法の設定、溶接きずの発生を抑えるためのルートギャップの管理等の組立て、溶接施工等に関する製作要領が策定された。同時に、部材ごとに応力振幅の大きさによって等級を分類し、製作時に許容される溶接きず（以下「許容きず」という。）の寸法が定められた。さらに、製作時に自動超音波探傷装置（以下「AUT」という。）による品質検査が行われ³⁾、保存された許容きずの寸法、位置等のデータを基に供用後の追跡調査結果と照合することで溶接きずを起点とする疲労亀裂の発生、進展の確認、疲労損傷度の評価を行うシステムが構築された⁴⁾。

1990 年度から 2000 年度にかけて、製作時に判明していた許容きずの追跡調査が実施された（写真-2）が、亀裂の発生や進展は確認されていない。また疲労亀裂進展解析の結果により、製作時の許容きずが亀裂の許容値まで進展するには 100 年以上要することが確認されている⁵⁾。現在、瀬戸大橋には新幹線荷重は载荷されず、在来線における貨物列車の運行本数も少ないことから疲労

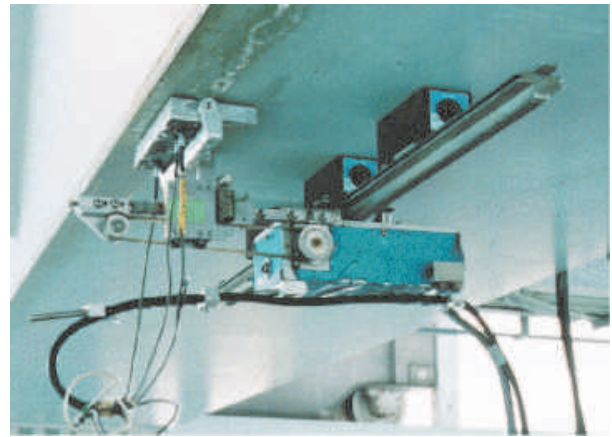


写真-2 AUT による現場調査
Photo 2 Automatic ultrasonic flaw detection

環境としては安全側にあると考えられるが、高価な AUT に代わる点検手法の開発が課題であり、まずは現状の疲労環境を評価する基礎データを収集するための現地計測を実施しているところである。

2.2 道路橋の疲労設計

道路鉄道併用橋の疲労設計に関する試験に引き続き、道路橋を対象としたトラス弦材、ケーブル、ハンガー一定着部、斜張橋ケーブル定着部及び鋼床版箱桁、鋼床版縦リブの現場継手部等の大型構造物の疲労試験も行われてきた。例えば、疲労耐久性が問題になると考えられる構造ディテールとして、大島大橋のハンガーブラケット部や生口橋のケーブル定着部等を選んで前述の大型疲労試験機を用いて疲労試験を実施している。これにより寸法効果や二次応力等に起因する疲労上の弱点部を把握することができ、その成果は疲労耐久性を向上するための実橋の構造ディテールの改善に役立てられている。

3. 疲労に対する取組

3.1 疲労関連業務実施マニュアルの整備

本州四国連絡道路の道路橋は、一部の構造詳細を除きほとんどが疲労を配慮した構造とはなっていない。これまで疲労亀裂の発生数は他の道路管理機関に比べて少ないが、大型車交通量の累積に伴い、今後増加するものと想定される。この事態に備えるため、疲労に関する点検・診断・補修・記録の業務要領が「疲労関連業務実施マニュアル（案）」として整備された⁶⁾。このマニュアルでは、疲労点検は定期的実施する「疲労基礎点検」と、疲労基礎点検の結果から疲労亀裂が疑われると判断された場合に実施する「疲労詳細点検」に区分される。さらに、疲労基礎点検は目視点検により疲労亀裂の疑われるものを発見する「疲労基礎点検（目視）」と、後述する温度ギャップ法により鋼床版デッキプレート-Uリブ溶接部のビード進展亀裂を発見する「疲労基礎点検（遠隔非破壊）」に区分されている。

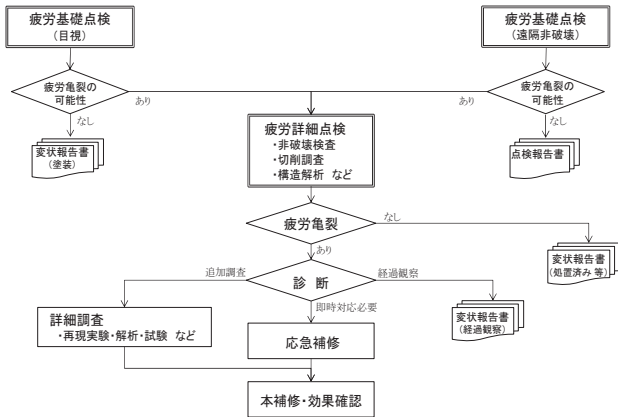


図-1 疲労関連業務フロー
Fig.1. Fatigue related business flowchart

これらの疲労に関する点検・診断・補修・記録は図-1に示す業務フローで実施することとしている。これにより詳細点検のフローを明らかにし、疲労に関する専門知識を有する疲労対策チームが詳細点検を行い、疲労分科会が補修の要否を診断することとしている。

3.2 鋼床版ビード進展亀裂検出と補修方法の開発

近年、重交通路線を中心にいくつかのタイプの疲労亀裂が多数発見されており、本州四国連絡高速道路の鋼床版でも同様な亀裂が発生している。亀裂は主に目視点検において塗膜割れやさび汁の発生を捉え、非破壊検査によって亀裂検出が行われるが、近接するための足場設置など多くの労力を必要とする。このため、本州四国連絡高速道路(株)(以下「本四高速」という。)では神戸大学との共同研究において、赤外線サーモグラフィを用いた手法によりビード進展亀裂を検出する技術(特許取得済)を開発した⁸⁹⁾。この手法の原理は、路面が日射を受け舗装→デッキプレート→Uリブと伝わる熱が、亀裂部では微小な隙間により熱伝導が阻害されることによる温度ギャップを赤外線サーモグラフィにより検出するというものである(図-2)。この手法は、塗膜割れを伴わない亀裂であっても遠隔から検出でき、目視のように近接するための足場を特に必要としないため、従来手法に比べて高性能かつ効率的な点検手法である。

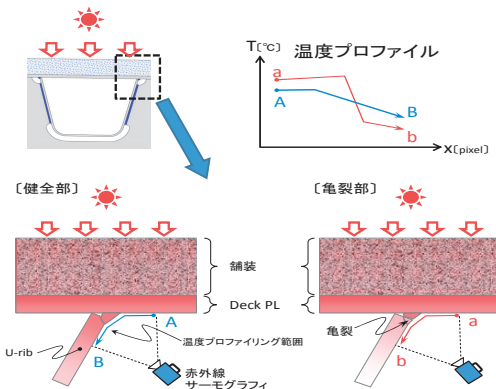
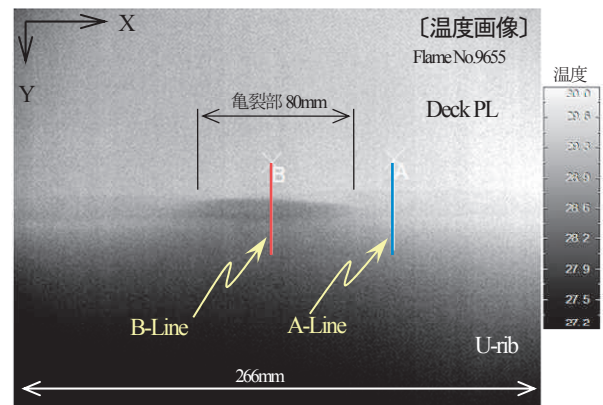


図-2 温度ギャップ検知法
Fig.2 Principle of temperature gap detection



写真-3 亀裂検出システムによる点検状況
Photo 3 Inspection of steel deck by developed system



撮影解像度: 0.83 mm/Pixel

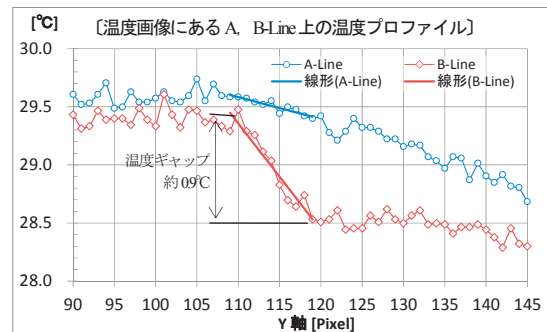


図-3 検出した亀裂の温度画像と温度プロファイル
Fig.3 Temperature image and temperature profile of the detected crack

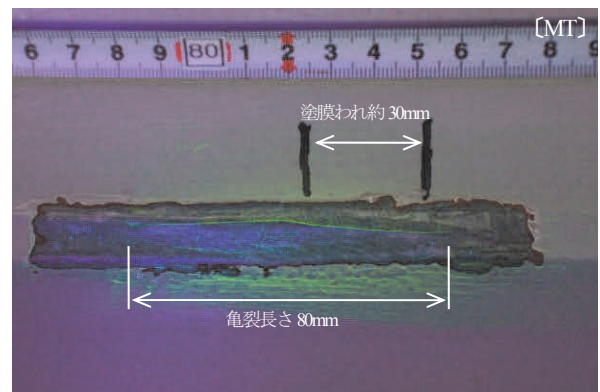


写真-4 検出した亀裂の磁粉探傷試験結果
Photo 4 Magnetic particle test results of the detected crack

本四高速では、本手法による疲労点検を 2015 年度から優先順位をつけ開始した(写真-3)。またそのための効率的な赤外線撮影が可能な装置と自動亀裂検出アルゴリズムによる検出システムを開発し、2016 年から実橋での点検に適用している(図-3、写真-4)。

また、前述の鋼床版デッキプレートとUリブの溶接部に見つかったビード進展亀裂に対する補修方法として、TRS (スレッドローリングスクリュー) を用いた床版下面からの当て板による補修方法を関西大学と共同で開発し、実橋で施工している¹⁰⁾(特許取得済み)。従来から行われている補修方法としては再溶接や高力ボルトを用いた当て板補修などがあるものの、再溶接では亀裂再発の懸念が残ること、高力ボルトを用いた当て板補修では舗装を部分的に剥ぐため止水性能の低下が懸念されることなどの課題があり、下面からのみで施工可能なこの方法は有効な手法である。

開発した補修方法は次の通りである。当て板はUリブと同材質同板厚とし、Uリブ側の接合は高力ワンサイドボルトφ20による摩擦接合、デッキプレート側の接合は片側から施工が可能なTRSφ16による支圧接合としている。図-4に詳細図を示す。施工にあたっては施工マニュアル(案)を作成し手順を決め実施した。また、東大阪橋梁維持管理研究会と共同で、削孔時に舗装を切削しないように削孔長さを調整する工具「ドリルストッパー」なども同時に開発した。また、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用いた工場での施工試験を実施し、施工能力や溶接部の切削方法などの細かな点について確認した。実橋では、横リブを挟む約2m区間で当て板を行い、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を確認できた。今後、試験施工区間の両端の調査孔を経過観察する等、本補修法の耐久性等を確認していくと

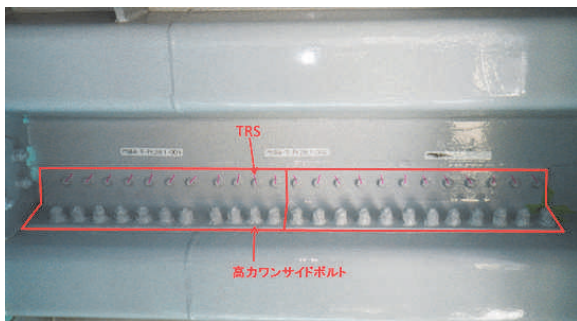


図-4 TRS を用いた下面補修法
Fig.4 Detail of repair method from lower side of deck

もに、施工効率の改善や使用工具の改良などを行っていく予定である。

3.3 鋼床版縦桁垂直補剛材の溶接部疲労亀裂

道路鉄道併用斜張橋(櫃石島橋及び岩黒島橋)の鋼床版縦桁の支点上横桁交差部の垂直補剛材(ウェブギャップ板)の一部に亀裂が発生していることが供用後21年目の点検で確認された(図-5、写真-5)。この亀裂は垂直補剛材上縁部外側まわし溶接部の止端部から溶接ビードに沿って現れている。現在亀裂の進展は確認されていないが、発生した亀裂が鋼床版横桁や鋼床版縦桁へ進展することがないように、補修方法の検討を行い現場で試験補修を行っている¹¹⁾。

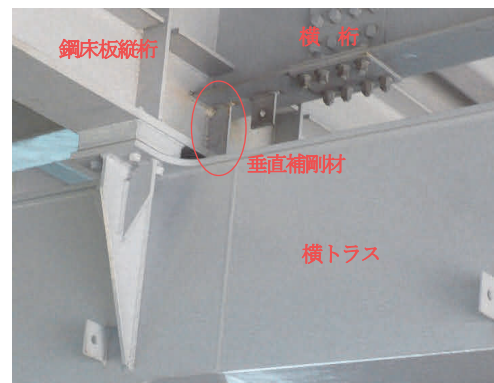
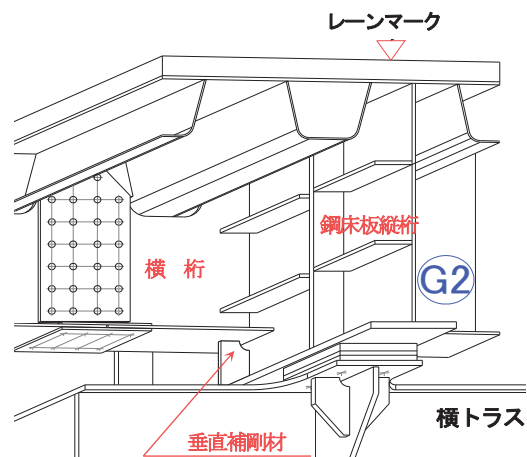


図-5 垂直補剛材構造概要
Fig.5 Detail of steel deck and location of the vertical stiffener



写真-5 垂直補剛材溶接部の亀裂
Photo 5 Crack in vertical stiffener

この亀裂に対する補修方法としては、当て板により補修する方法の他に、補剛材を半円に切欠く方法を選定し（図-6）、亀裂部に発生する応力の低減効果について解析・比較検討を行った。

検討結果を踏まえて現地では上記2案による試験施工を行い、施工性の比較を行うとともに赤外線サーモグラフィによる応力計測等を行い、補修による効果の確認を行っている（写真-6）。

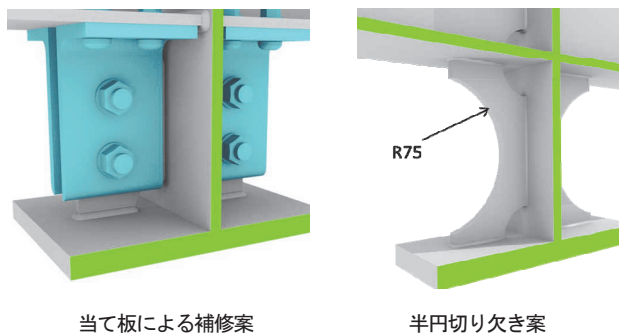


図-6 垂直補剛材溶接部の補修方法
Fig.6 Repair methods for vertical stiffener

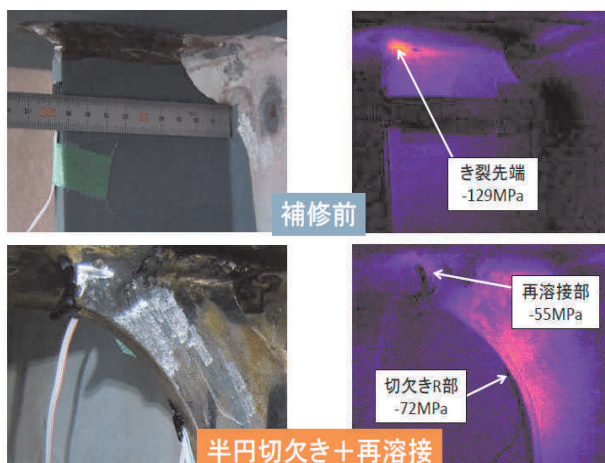


写真-6 応力分布状況
Photo 6 Stress distribution

4. おわりに

本四連絡橋は、他の道路管理機関に比べて建設からの経過年数が比較的短く、他機関で見られるような深刻な疲労損傷は幸いなことに現在のところ発生していない。しかしながら経過年数が増加するにつれて他機関で見られるのと同様の深刻な疲労亀裂がいずれ発生することが懸念される。開発された点検・補修技術の高度化など今後も継続的に検討を行い、現場と密接に連携して安全・安心・快適な道路環境を提供できるように努めていく所存である。

参考文献

- 1) 日本道路協会：鋼橋の疲労、1997.5
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編、2002.3
- 3) 成井信：自動超音波探傷システムを用いた北備讃瀬戸大橋補剛桁部材検査、本四技報、Vol.12、No.47、pp.30-37、1988.7
- 4) 石山四郎、岩屋勝司、吉澤光男、梶本勝也、八島実：瀬戸大橋溶接部の非破壊検査システム、橋梁と基礎、pp.33-39、1992.1
- 5) 森山彰、横井芳輝、田向和則：本四連絡橋の疲労設計、本四技報、Vol.32、No.110、pp.57-61、2008.3
- 6) 溝上善昭、森山彰：鋼床版Uリブビード貫通亀裂検出法の開発と疲労関連業務の体制整備、本四技報、Vol.40、No.125、PP2-10、2015.9
- 7) 小林義弘：疲労対策への取組（疲労対策チーム活動）、本四技報、Vol.38、No.121、pp.33-34、2013.9
- 8) 溝上善昭、奥村淳弘、大藤時秀、和泉遊以、阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ法によるUリブ鋼床版のビード貫通亀裂の自動検出と装置開発、構造工学論文集、Vol.64A、2018.3 [掲載決定]
- 9) 溝上善昭、小林義弘、和泉遊以、阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版デッキプレート-Uリブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出、鋼構造論文集、第22巻、第87号、pp.47-56、2015.9
- 10) 溝上善昭、森山彰、小林義弘、坂野昌弘：Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂に対する下面補修工法の提案、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.73、No.2、pp.456-472、2017.8
- 11) 藤城忠明：鋼床版支点部ウェブギャップ板のまわし溶接部に発生した亀裂の補修検討、本四技報、Vol.40、No.125、pp.52-53、2015.9

この10年における本四連絡橋の耐震補強

Seismic retrofit for Honshu-Shikoku Bridges in the last 10 years

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

田村 正 Tadashi Tamura

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

近い将来、東南海・南海地震の発生が予測されるなど、本州四国連絡橋の設計時に想定した地震力を上回る規模の地震の発生が懸念される状況下にある。そこで、代替道路がない重要な道路ネットワークの一部を形成する本州四国連絡橋の大規模地震に対するさらなる安全性の向上を目指し、耐震検討を進めている。最近10年間に実施してきた耐震検討用の大規模地震動の設定、明石海峡大橋及び瀬戸大橋の耐震性能照査と耐震補強設計の結果等について、その概要を紹介する。

Large-scale earthquakes, such as Tonankai-Nankai Earthquake, are to be happened in the near future. The seismic force of such earthquakes may exceed earthquake motions considered in the original design for Honshu-Shikoku Bridges. Seismic retrofit study has been going on to further improve the seismic safety of Honshu-Shikoku Bridges against large earthquakes because the Bridges have no alternative highways regardless of a part of important highway networks. The report shows the outlines of the evaluation of large earthquake ground motions, seismic verification and retrofit design for both the Akashi-Kaikyo Bridge and the Seto-Ohashi Bridges.

1. はじめに

本州四国連絡高速道路の長大橋（支間200mを超える橋梁）の耐震設計には、本四公団（当時）が独自に制定した設計基準が適用され、支間200m以下の橋梁（以下「一般橋」という。）の設計には道路橋示方書が適用されている。長大橋の設計においても、本四公団の設計基準で規定されていない多くの事項については、道路橋示方書を適用して設計が行われてきた。

長大橋の耐震設計に関する規定として、「耐震設計指針・同解説」¹⁾と「耐震設計基準・同解説」²⁾（以下「耐震基準S52」という。）が生口橋までの長大橋の設計に適用されてきた。その後建設された明石海峡大橋等の長大橋に対しては、各橋梁ごとに個別に設計地震動を検討して設定し、「明石海峡大橋耐震設計要領（案）・同解説」³⁾（以下「明石要領」という。）、「明石海峡大橋上部構造耐震設計要領（案）」⁴⁾、「来島大橋剛体基礎耐震計算法（案）」⁵⁾等を制定し、適用してきた。一般橋においては、主に、昭和46年から平成2年までの「道路橋示方書・同解説」⁶⁾等が適用されたが、比較的新しい区間の一般橋の一部（例えば、神戸淡路鳴門自動

車道の神戸西IC～津名一宮IC間、西瀬戸自動車道の西瀬戸尾道IC～向東BS間、生口南IC～大三島IC及び大島南IC～今治IC間）には、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様」⁷⁾（復旧仕様）を適用して照査が行われたり、平成8年の「道路橋示方書・同解説」⁸⁾が適用されたものもある。

近い将来、東南海・南海地震等のプレート境界型の大規模地震の発生が予想されるなど、設計時に想定した地震力を上回る規模の大地震の発生が懸念される中、一般橋だけではなく、長大橋においても、兵庫県南部地震のような内陸直下型の大規模地震動を考慮した設計が行われていないことを考慮し、現況の耐震性能を照査して、必要に応じて、耐震補強設計の結果に基づき、耐震補強を計画的に進めている。

耐震検討にあたり、明石海峡大橋や瀬戸大橋など本州四国連絡橋は代替道路がなく、災害時には緊急輸送路として機能することが要求されることを踏まえ、大規模地震時の目標耐震性能は、安全性だけではなく、地震後の供用性や修復性の観点から設定している。具体的には、次のとおりである。

安全性：落橋や倒壊が生じない。

供用性・修復性：

- ・修復が可能な損傷にとどまる。
- ・地震後の点検や応急復旧により、緊急車両は通行可能となる。
- ・恒久的な復旧を行いながら、走行制限等を実施することにより、地震後短期間で一般車両の通行も可能となる。

平成24年の「道路橋示方書・同解説」⁹⁾（以下「道示」という。）に示されるように、発生する確率は低い大きな強度をもつ地震動（レベル2地震動）に対し、地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかに行い得るとされる「耐震性能2」を確保することを目標としたものである。

2. 耐震補強の経緯

平成17年、国土交通省より、新潟県中越地震等の発生や東南海・南海地震等の大規模地震のひっ迫性が指摘されたこと等を踏まえ、事務連絡「道路、新幹線の橋梁の耐震補強の推進について」¹⁰⁾が公表され、緊急輸送道路や新幹線の高架橋橋脚等の耐震補強を推進することとなった。当時の本四公団は、「緊急輸送道路の橋梁耐震補強3箇年プログラム」を策定し、以下に示す耐震性能の低い橋梁に対して、緊急輸送道路としての機能を確保する対策を実施した。

- 1) 昭和55年の道示より古い基準を適用した一般橋
- 2) バックスティ径間トラス部を有する大鳴門橋と瀬戸大橋トラス橋（櫃石島高架橋トラス部、与島橋及び番の州高架橋トラス部）

大鳴門橋においては、上屋道路桁橋脚の補強、バックスティ径間のトラス支承や鋼床版支承への変位制限構造や段差防止構造等を設置した¹¹⁾。瀬戸大橋トラス橋の支承には大型のピン支承やピボット支承が使用されており、トラス支承が損傷すると、地震直後の緊急車両の通行に支障となる路面の段差やトラス本体の損傷などが生じ、橋梁の供用性や修復性の確保が困難となるため、損傷する可能性の高い支承部を選定し、段差防止構造を設置した¹²⁾。

平成20年から、直轄国道等と連携した本州と四国間の交通路を確保するための耐震補強を実施することになった。そこで、ルートごとの優先順位として、東南海・南海地震の影響度や今後の地震発生確率、交通量、鉄道等被災時の社会的影響を考慮し、1)神戸淡路鳴門自動車道、2)瀬戸中央自動車道、3)西瀬戸自動車道とした。ルート内の優先順位としては、1)海峡部を挟む最短IC間にある長大橋や一般橋、2)鉄道・重要道路等をまたぐ一般橋、3)それ以外の一般橋の順とした。

この計画に従い、神戸淡路鳴門自動車道の海峡部を含む最短IC間（垂水IC～淡路IC、淡路島南IC～鳴門IC）に位置する橋梁の耐震補強に着手した。淡路島南IC～鳴門

IC間にある大鳴門橋及びその取付橋や一般橋の耐震補強は平成28年3月に、垂水IC～淡路IC間に位置する明石海峡大橋を含む一般橋の耐震補強は平成28年5月に、それぞれ完了した。

平成25年度から、平成32年度末の完成を目指して、瀬戸中央自動車道の最短IC間として、瀬戸大橋を含む児島IC～坂出北IC間の耐震補強に着手した。また、これと並行して、平成28年度からは、西瀬戸自動車道の各海峡部最短IC間の耐震補強にも着手した。

一方、平成28年11月、国土交通省より、緊急輸送道路の耐震補強の加速化の方針が示された。高速道路や直轄国道について、大規模地震の発生確率（今後30年間に震度6弱以上の揺れに見舞われる確率が26%以上。言い換えれば、約100年に1回程度、震度6弱以上の揺れが発生する可能性がある）等を踏まえ、落橋・倒壊の防止対策に加え、路面に大きな段差が生じないように、支承の補強や交換等を行う対策について、

- 1) 当面5年間（平成33年度末まで）で、少なくとも、発生確率が26%以上の地域において、完了させる
- 2) 今後10年間（平成38年度末まで）で、全国で耐震補強を完了させる

とするものである。これを踏まえ、最短IC間にある長大橋の耐震補強の推進に加え、平成29年度より、該当地域に位置する一般橋の耐震補強を優先的に実施していくことにした。

3. 耐震補強検討用地震動

3.1 一般

長大橋の耐震性能照査及び耐震補強設計の実施にあたり、プレート境界型地震（タイプⅠ）と内陸地震（タイプⅡ）の2種類を想定し、1)当該橋梁に大きな影響を与えることが予想されるシナリオ地震をタイプⅠ、タイプⅡごとに想定して、それぞれ適切な手法により推定した地震動、2)シナリオ地震が無い場合の最低レベルの地震動（伏在断層）等を総合的に判断して設定した¹³⁾。

近年、活断層調査の結果等に基づく断層モデルを用いた手法により、設計地震動を設定する手法が開発されてきた。また、長大橋の建設時に実施された密度の濃い地盤調査の結果を本四高速が保有していることに加え、兵庫県南部地震以降に実施された断層調査等により地下構造に関する情報が相当程度明らかになり、内閣府中央防災会議等の政府関係機関から公表された¹⁴⁾。そこで、明石海峡大橋や瀬戸大橋の耐震補強検討用地震動は、断層モデルを用いた手法により各架橋サイト固有の大規模地震動を推定して設定することにした。

3.2 設定方針

長大橋の耐震性能照査に用いる大規模地震動は、次に

示す方針に基づき設定した。

- 1) 大規模地震動は、政府関係機関から公表された地震情報に基づき、サイトごとにプレート境界型地震、内陸直下型地震について、シナリオ地震を想定した。内陸直下型地震については、未知なる活断層（伏在断層）の存在の可能性に配慮して、M6.8の地震が当該橋梁の直下域で発生する場合の地震動も考慮することにした。
- 2) 1)で想定する地震の断層破壊シナリオは、過去の履歴が蓄積されているプレート境界型地震については公表されたシナリオに従うものとし、不確定性の大きいスラブ内地震及び内陸直下型地震については当該橋梁に最も大きな影響を及ぼすと考えられるシナリオを想定した。対象橋梁は様々な振動特性をもつ構造要素から構成される長大橋であるため、特定の周期帯でなく広帯域（0.05～30秒程度）における地震動強度が大きく推定されるように、アスペリティの位置や大きさ、破壊開始点を変化させた複数ケースのシナリオを考慮した。
- 3) 大規模地震動の推定は、震源特性、伝播経路特性及びサイト周辺の地盤特性を適切に考慮するとともに、広帯域での地震動を精度よく推定するため、ハイブリッド法により行った。
- 4) 加速度応答スペクトルは、地震動の平均的な特性を考慮するため、3)より算出された時刻歴加速度波形に基づく加速度応答スペクトル（複数の断層破壊シナリオを考慮した場合は複数のスペクトル）をおおむね包含するとともに、特別なピークを平滑化して定めた。
- 5) 大規模地震動の定義位置は工学的基盤面とし、3次元的地震動として定義した。

3.3 耐震性能照査に考慮した地震動

明石海峡大橋及び瀬戸大橋地点の耐震補強検討用地震動は、それぞれの地震環境や地盤状況等を踏まえた断層モデルにより、次の地震を対象として設定した。なお、

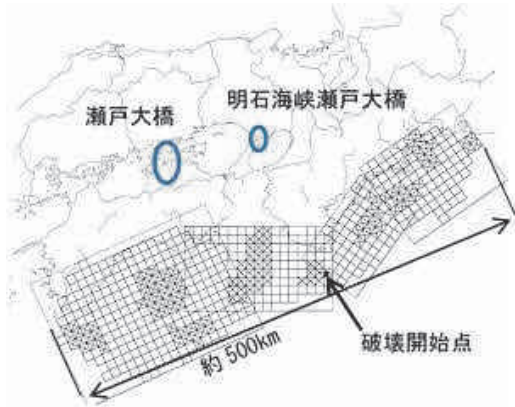


図-1 東南海・南海地震の断層モデル
Fig. 1 Fault model for Tonankai-Nankai Earthquake

地震動は各基礎共通となる工学的基盤面（せん断弾性波速度 $V_s=1500\text{m/s}\sim 2500\text{m/s}$ ）上の値として求めた。

(1) プレート境界型地震

プレート境界型地震としては、明石海峡大橋及び瀬戸大橋に共通して、東南海地震と南海地震が連動するM8.5級の地震を考慮した。図-1に、東南海・南海地震の断層モデル（内閣府中央防災会議の設定に準拠¹⁵⁾）を示す。

図-1に示す東南海・南海地震の震源域の長さは約500kmであり、平成23年東北地方太平洋沖地震の震源域の長さ約500kmとほぼ同程度の長さである。なお、図-1に示すように、東海地震の震源域を考慮していないが、東海地震の震源域の一つとされる静岡県御前崎周辺から各ルート長大橋までの距離は約300km程度以上と遠く、東海地震による地震動の影響は小さいと考えたためである。

(2) 内陸直下型地震

内陸直下型地震として、明石海峡大橋では、六甲・淡路島断層六甲山地南縁-淡路島東岸区間（六甲淡路断層帯）を起因とする地震を、瀬戸大橋に関しては、中央構造線断層帯讃岐山脈南縁-石鎚山脈北縁東部（鳴門-石鎚断層）の地震を対象とした。図-2に、六甲淡路断層帯を、図-3には、中央構造線断層帯の一部である鳴門-石鎚断層を示す。断層モデルの設定は文部科学省地震調査研究推進本部の設定等¹⁶⁾にならうことにしたが、断層傾斜は平成7年兵庫県南部地震を参照して80度とし、断層破壊シナリオは、長周期域で大きめの地震動が推定

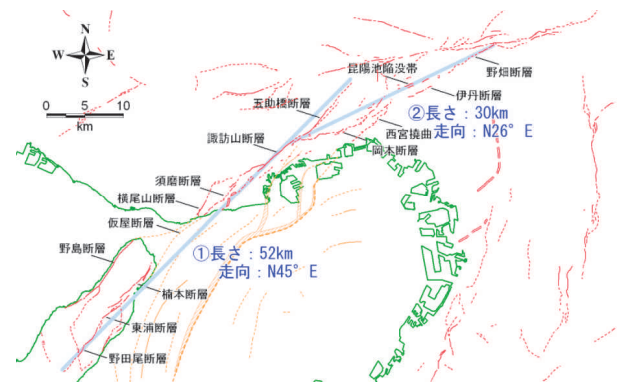


図-2 六甲淡路断層帯の断層モデル
Fig. 2 Fault model for Rokko-Awaji Earthquake

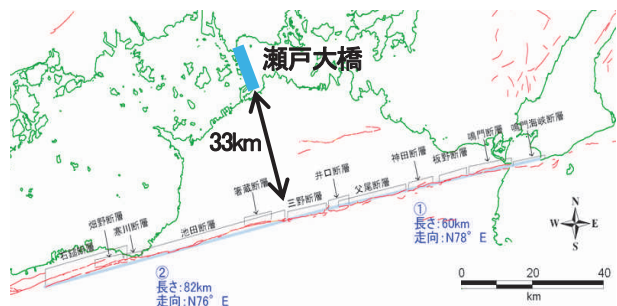


図-3 中央構造線断層帯の断層モデル
Fig. 3 Fault model for earthquake from Median Tectonic Line

されるように、架橋サイト近傍にアスペリティを集中して配置するとともに、破壊の伝播方向が架橋サイトに向かうように破壊開始点を設定した。

(3)未知なる活断層（伏在断層）による地震

近年、活断層が特定されている場所以外で多くの被害地震（2000年鳥取県西部地震、2004年新潟県中越地震、2005年福岡県西方沖地震等）が発生している。さらに、伏在断層に伴う地震動の下限レベルへの適用及びその必要性に関して、内閣府中央防災会議¹⁵⁾、土木学会¹⁷⁾等の公的機関から公表された資料の中でも言及された。

そこで、検討用地震動に伏在断層による地震動を想定することにした。伏在断層による地震規模については、近年の地震被害、公的機関等の提案、長大橋周辺の断層調査結果及び有意な歴史地震の調査等からM6.8とし、2種類の断層破壊シナリオ（鉛直横ずれ断層、傾斜60度の逆断層）を考慮した。地震動強度が大きくなるように、ほぼ断層直上の複数点における地震動を計算し、それらを評価することにより、伏在断層による地震動を設定した。

3.4 明石海峡大橋

図-4に、明石海峡大橋の工学的基盤面（ $V_s=2000\text{m/s}$ ）上において推定した東南海・南海地震、六甲淡路断層帯及び伏在断層による地震動から設定した耐震補強検討用地震動と明石要領に規定された設計地震動の加速度応答スペクトルを示す。

3.5 瀬戸大橋

瀬戸大橋の工学的基盤面（ $V_s=1500\text{m/s}$ 、 2500m/s ）上において推定した東南海・南海地震、鳴門-石鎚断層帯及び伏在断層による地震動の加速度応答スペクトルを図-5に示す。瀬戸大橋は下津井瀬戸大橋から番の州高架橋まで南北約10kmに渡ることから8地点での地震動を推定した。しかし、各地点での地震動強度はほぼ同等であったことから、各大規模地震動の加速度応答スペクトルは一種類とした。

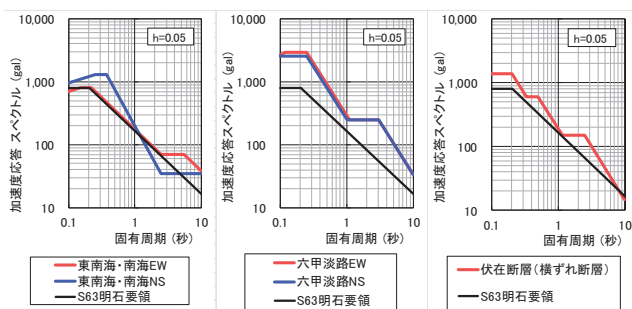


図-4 明石海峡大橋の検討用地震動の加速度応答スペクトル
Fig. 4 Design acceleration response spectra for Akashi-Kaikyo Bridge

4. 耐震性能照査

4.1 耐震検討に考慮する荷重

耐震基準S52では、地震時には、地震時活荷重を考慮することが規定されていた。本基準に規定されていた地震動はレベル1地震動とみなし、レベル2地震動を考慮した耐震検討の際には、道示の規定に準用し、活荷重（自動車荷重）は考慮しないものとした。

一方、瀬戸大橋における耐震検討の際には、「鉄道構造物等設計標準・同解説」¹⁸⁾（以下「鉄標」という。）の規定に従い、列車荷重を考慮することにした。耐震性能照査等における列車荷重の載荷方法は、鉄標に従い、以下のとおりとした。

1) 単線載荷（満載）を考慮

吊橋など支間200mを超える長大橋では上部構造の重量が大きく、相対的に列車荷重の影響は小さいことから、単線満載載荷とした。なお、当初設計では、長大橋ごとに列車荷重強度を使い分けるとともに、当時の鉄道の基準類にならって列車荷重の最大載荷長（地震時は最大400m）を適用していた。

2) 荷重強度を70%に低減（35kN/m）

3) 列車の地震時慣性力には上限値（軌道方向0.2g、直角方向0.3g）を考慮

本来、列車荷重は、影響線載荷して設計することが標準とされているが、耐震検討のように動的解析を行う場合には非常に煩雑となるため、その代わりとして、1)と2)の条件を適用することにより、それと等価な解析を実施したと見なされる。

なお、瀬戸大橋は将来的に新幹線の載荷を考慮して当時の設計が実施されているが、現在は在来線のみ載荷となっているため、耐震検討は現構造（在来線のみ、新幹線なし）を考慮して実施した。

4.2 解析概要

解析モデルに入力する地震動は、工学的基盤面における耐震補強検討用地震動を基に、各基礎底面位置で有効入力地震動を算出して用いた。地震動の作用方向は、吊

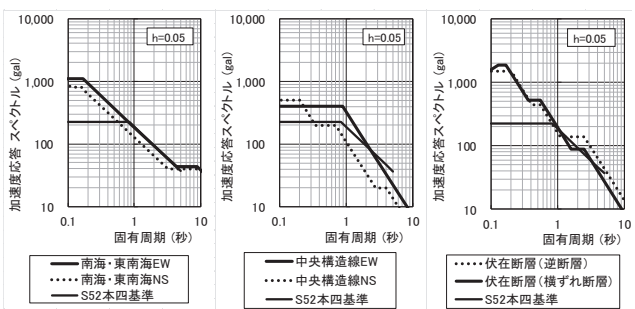


図-5 瀬戸大橋の検討用地震動の加速度応答スペクトル
Fig. 5 Design acceleration response spectra for Seto-Hashi Bridge

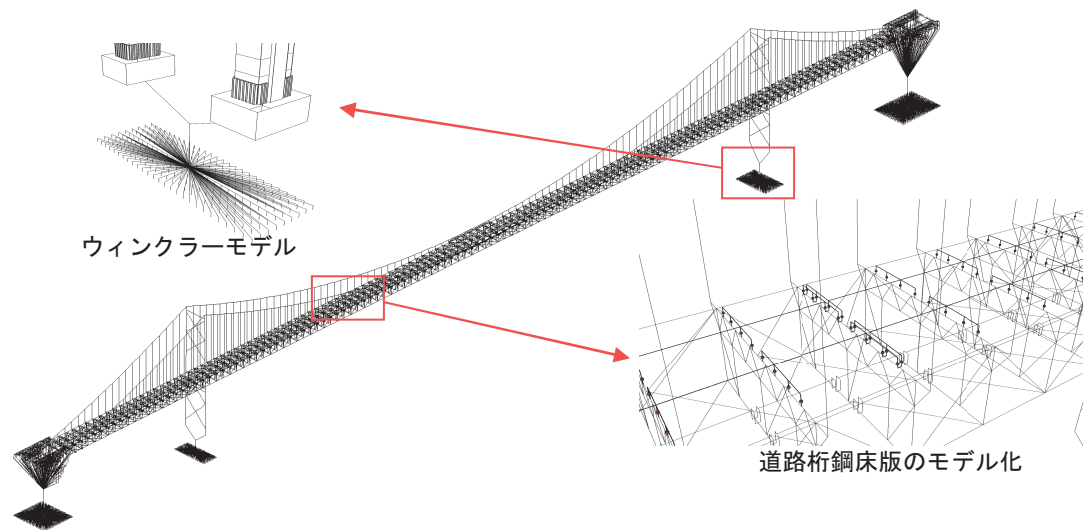


図-6 北備讃瀬戸大橋の解析モデル
Fig. 6 Analytical model for Kita-Bisan Seto Bridge

橋や斜張橋など支間長200mを超える長大橋の場合には、東南海・南海地震、六甲淡路断層帯や中央構造線による地震動を考慮するときには、橋軸方向・橋軸直角方向・鉛直方向の3方向同時入力とした。一方、支間長が200m未満のトラス橋や高架橋の場合には、道示の考え方を参考に、いずれの地震動を考慮する場合にも、橋軸方向と鉛直方向、橋軸直角方向と鉛直方向のそれぞれの組合せとして、2方向同時入力とした。

吊橋のようなフレキシブルな橋梁では材料の非線形性だけでなく幾何学的な非線形性も無視できないため、それらを考慮できる複合非線形動的解析にて実施した。減衰モデルには、要素別剛性比例型を用い、減衰及び振動特性が異なる部材ごとに減衰項を設定するとともに、タワーリンク等の高剛性部材の減衰力を過大に評価することを回避した。

地震応答解析に用いた3次元全橋骨組みモデルの例として、北備讃瀬戸大橋のモデル¹⁹⁾を図-6に示す。解析モデルは、大規模地震時の複雑な非線形挙動を極力忠実に再現できるように、管理路を除く全てのトラス部材をモデル化し、各部材の非線形特性や復元力特性を設定して作成した。主塔や補剛桁は部材の塑性化が想定されるとともに、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。また、局部座屈強度が全強ではない要素については、圧縮側降伏応力度を局部座屈強度に低減した非対称なバイリニア型の材料構成則を採用した。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、圧縮力が作用したときにたわむことが表現できるモデルとした。基礎と地盤間の滑動や浮上りの発生が考慮できるように、基礎底面の鉛直方向と水平方向に非線形地盤ばねを分散して配置した(ウィングラーモデル)。なお、

斜張橋やトラス橋においても、上記に該当するものについては、同様な解析モデルを作成した。

4.3 明石海峡大橋の耐震性

明石海峡大橋の耐震性照査の結果²⁰⁾、補剛桁については、側径間においてアンカレイジと衝突が発生するものの主塔との衝突は生じず、各部材に問題となる損傷は生じない結果となった。また、下部構造や主ケーブル等のロープ類にも損傷は生じないが、主塔や一部の二次部材に損傷が発生することがわかった。

主塔の塔柱基部において、座屈強度に対して最大で103%の応答が発生した。そこで、塔柱基部に対してシェル要素を用いた弾塑性FEM解析を荷重増分法で行い、動的解析の断面力は最大耐力以下であること、主塔の耐力は塑性化した後も急激に低下することがないことを確認し、座屈強度をわずかに超える応答は許容することにした。

鋼床版については、一部の支承が損傷する結果となったが、支承の破壊は慣性力によるものではなく、補剛桁の変形に20径間連続の鋼床版ブロックが追従できないためによるものであり、全ての支承が破壊して鋼床版ブロックが補剛桁から外れることはないことから、鋼床版の一部支承の損傷も許容することにした。

側径間補剛桁の主塔側の伸縮装置において、伸縮量を超える変位が発生することが確認された。明石海峡大橋では大型のリンク式伸縮装置が採用されており、伸縮装置が損傷して落下すると、橋軸方向に2mを超える空間が発生し、地震時における通行車両の安全性や地震後の緊急車両の走行性に影響を及ぼすこととなる。このため、ストッパー等を設置して、伸縮装置が損傷しても落下しない対策を実施することにした。

(3) トラス橋

トラス橋のうち、櫃石島高架橋トラス部と与島橋2径間部には多くの損傷が生じる結果となった。一方、与島橋3径間部と番の州高架橋トラス部は、前2橋とは振動特性が異なる（固有周期が長い）ことから、損傷箇所数が比較的少ない結果となった。

与島橋3径間部²²⁾は上下弦材などの主構には損傷は見られなかったが、上下横構の一部や横トラスの上弦材などが損傷する結果となった。この損傷は、主に圧縮時の座屈安定照査によるものである。また、道路桁鋼床版は4径間連続構造（一部3径間）で中間支承が橋軸方向に固定となっており、この固定支承の耐力不足と橋軸直角方向においても一部の支承の耐力が不足する結果となった。

一方、与島橋2径間部²³⁾においては、3径間部とは異なり、上下弦材、上下横構、主横トラスを構成する部材など多くの部材が損傷する結果となった。その中には、JR営業線上空に位置する補強が困難なき電線を支持するトラス部材が含まれていた。また、鋼床版を支える道路桁支承も多数損傷する結果となった。3径間部と比べて、損傷の程度が多くなった要因として、2径間部の固有周期が橋軸方向及び橋軸直角方向とも3径間部に比べて小さいこと、2径間部は径間割り、橋脚高、重量のバランスが径間で異なり、複雑な変形状を示すことなどが考えられた。

番の州高架橋トラス部²⁴⁾は、与島橋3径間部とは異なり、主構の上下弦材に損傷が見られた。これは、南備讃瀬戸大橋7Aアンカレイジ上の固定支承に比べ、BValP、BVa2Pがフレキシブルな橋脚であり、BB7A支承側に慣性力が集中したためと考えられる。また、BValP近くの上弦材は、連続トラス形式のため引張部材として常時の荷重状態で設計されており、大規模地震時に作用する圧縮力により、照査を満足しなくなった。道路桁は、10径間+12径間+10径間連続の鋼床版であり、橋軸方向は各径間端部が固定となっている。そのうち、BValP、BVa2P支点上の道路桁の橋軸方向固定支承の耐力が不足する結果となった。

櫃石島高架橋トラス部²⁵⁾では、固定のトラス支承が位置するHVa30P側において、主横トラスを構成する部材、



図-9 リンク型伸縮装置（明石海峡大橋）

Fig. 9 Link type expansion joint (Akashi-Kaikyo Bridge)

上下横構など多くの部材が損傷することが確認された。その中には、JR営業線上空に位置する補強が困難なき電線を支持するトラス部材が含まれていた。また、鋼床版を支える道路桁支承の多くや4基のトラス支承全ての耐力が不足することが確認された。本橋においては、耐力に対して応答値の超過率が大きい4基のトラス支承をはじめ、個別の部材補強は困難と判断し、橋梁全体系を考慮した耐震性向上の検討を実施することにした。

(4) 高架橋

長大橋をつなぐ高架橋においては、一般橋と同様、橋脚のせん断補強、支承補強、落橋防止システムの設置などが必要となる箇所が多数確認された。橋脚補強としては、施工性、基礎構造への影響、経済性などを考慮し、炭素繊維巻立て若しくはアラミド繊維巻立てを実施することにした。

櫃石島高架橋²⁶⁾では、鉄道桁を支持する横梁より下方の橋脚は一部の橋脚でFEM解析によるせん断耐力評価を行い、許容値内であることを確認した。その横梁より上方の柱部については橋軸直角方向のせん断照査が全ての柱部で満足せず、せん断補強が必要と判断した。支承部は橋軸直角方向の耐力が多く、支承部で不足する結果となり、対策が必要と判断した。

与島高架橋では、橋軸直角方向の地震時において、全ての橋脚の柱部や梁部にせん断損傷が生じることが確認された。立体ラーメン橋脚である4P橋脚は構造が非常に複雑であり、道示に従って算出されたせん断耐力に対して、ほぼ全ての部位において応答値の超過率が大きくなった。適切な補強対策を立案するために、3次元のFEM解析によりせん断耐力を評価した結果、せん断耐力が不足するのは、中層の柱部においてのみということが確認できた。

なお、番の州高架橋の橋脚補強数量は、他の高架橋とは異なり、地盤条件の違いからゼロとなり、わずかな支承補強のみ必要であることが確認できた。

5. 耐震補強検討

5.1 概要

耐震対策は、免震、制震、長周期化、構造系の変更などの橋梁全体系対策と損傷する部位を直接補強する部材補強対策に大別される。全体系対策は要補強箇所を直接補強するものではないが、補強範囲が部材補強対策より小さくなる場合がある。明石海峡大橋や、瀬戸大橋を構成する鋼橋（吊橋、斜張橋、トラス橋）は、その規模が大きいため、通常の部材補強対策ではその補強規模、数量が膨大となる可能性があることを考慮し、まず、全体系対策を検討し、次に、それでも照査を満足しない箇所が残る場合には、部材補強対策を実施することを基本とした。

5.2 明石海峡大橋の耐震補強

耐震性能照査の結果、リンク式伸縮装置（図-9）において、地震時の安全性及び地震後の走行性を確保するために耐震補強が必要となり、その設計²⁹を実施した。以下に、検討概要を示す。

桁端の大変位を吸収するための伸縮装置は、当初設計では、移動量はそれぞれ橋台部 $\pm 450\text{mm}$ 、主塔部側径間側 $\pm 600\text{mm}$ 、主塔部中央径間側 $\pm 1450\text{mm}$ である。耐震性能照査を実施した結果、主塔部側径間側において $+830\text{mm}$ （伸びる方向）、 -724mm （縮む方向）の移動量が発生し、設計値を超過する結果となった。一般橋では、レベル2地震時には伸縮装置の損傷が許容されている。これは、伸縮装置が損傷しても、橋の致命的な被害を引き起こす可能性は低く、路面に鉄板を敷く等の応急復旧により緊急車両の通行が可能となるためである。しかし、明石海峡大橋の場合、伸縮装置が損傷すると、路面に橋軸方向に2mを超える開放空間が発生し、通行車両の安全性及び緊急車両の走行性を確保できない。一方、桁の地震時橋軸方向水平変位を低減して伸縮装置の損傷を発生させない対策や設計移動量の大きい伸縮装置への交換は非常に大掛かりとなる。そこで、伸縮装置の損傷は許容するが、設計値を超過する上記移動量が発生しても耐震性能2を確保する対策を検討することにした。

まず、過大な伸びが発生する際、リンクプレート（図-10）の破壊が先行すると、リンク機構が崩壊して、通行車両の安全性等の確保が困難になる。そこで、破壊をユニバーサルジョイント（UJ）部に誘導する対策として、UJ部前面の横梁にPCケーブルを設置した（図-10）。本対策により、過大な伸びが生じた場合、UJ部が先行して破壊し、装置本体と橋体とが分離することになる。橋体と分離した後、伸び方向に移動可能量（ $+706\text{mm}$ ）を超えるとストッパーにより装置本体の移動が拘束され、リンク機構が崩壊することになる。過大な伸びが発生した場合、装置本体の移動を拘束せず、鉛直支持を確保する対策として、既設ストッパーを大型のストッパーに取り替えた（図-11）。

5.3 瀬戸大橋の耐震補強

(1) 吊橋

補強対象の支承のうち、G4桁支承の位置は鉄道営業

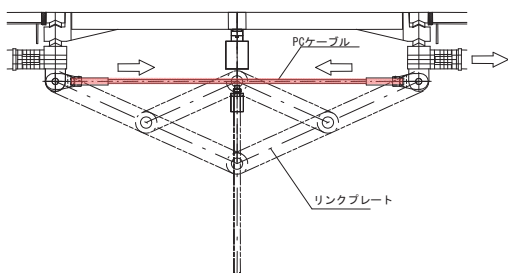


図-10 伸縮装置の落下防止対策①
（明石海峡大橋）

Fig. 10 Fall prevention measures-1 of expansion joint

線上空に位置するので、まず、施工性に優れるG1桁支承を先行して補強を行い、その状態での構造系で再度耐震解析を行い、損傷するG4桁支承を特定し、それらも補強対象とすることにした¹⁹。

支承補強は、不足する耐力に応じて、その構造を検討した。補強規模の大きい構造の例を図-12に示す。橋軸方向の支承補強は、道路桁にブラケットを設置し、主横トラス上弦材に反力を取る構造とした。一方、橋軸直角方向の支承補強としては、支承の左右、主横トラス上弦材上に部材を設置し、それにより補強する構造とした。

G2桁～G4桁が鋼床版によって連結されているのに対し、G1桁はそれらから分離した構造になっている。G1桁支承を補強する箇所においては、G1桁と他の桁との一体化を確実にするために、G1桁とG2桁との間に設置されている横構の補強若しくは交換も必要になった。

(2) 斜張橋

櫃石島橋及び岩黒島橋における地震応答解析において横トラス下弦材のウェブが損傷した要因は、局部座屈を考慮した許容圧縮応力度を超える地震慣性力が作用するためであった。同部材の上下フランジはいずれも十分な耐力を有していたため、ウェブの局部座屈を向上させる補強対策が効果的と判断し、両橋の横トラス下弦材ウェブのリブ補強（座屈パラメータの改善）を耐震対策²¹とした。

横トラス下弦材は鉄道軌道を直接支持しており、ウェブの外側に多数の補剛材が取り付けられている。下弦材の断面が $1000\text{mm} \times 800\text{mm}$ 程度と大きいことを考慮し、補強設計においては、下弦材内側から高力ボルトによる補強リブの取付けを計画した。これまで、密閉されたトラス部材をボルト孔開けのために開放する場合には、防食対策に十分配慮しながら補強をすすめてきた。現在、外側からだけの施工により締め付けが可能であり、気密性や水密性にも優れたTRS（スレッドローリングねじ）の採用の可否について、検討を実施している。

(3) トラス橋

トラス橋（特に、櫃石島高架橋トラス部と与島橋2径間部）には多くの損傷が生じる結果となった。

個別部材補強が困難と判断された櫃石島高架橋トラス部²³においては、橋梁全体系を考慮した耐震性向上を検討した。その結果、トラス桁の鋼製支承を免震支承に交

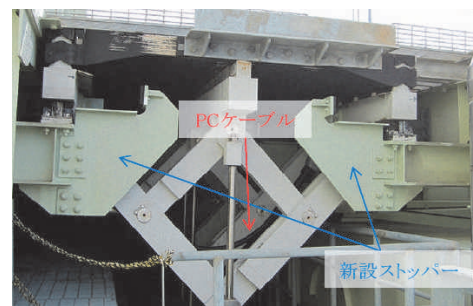


図-11 伸縮装置の落下防止対策②
（明石海峡大橋）

Fig. 11 Fall prevention measures-2 of expansion joint

換することにより、補強が困難なトラス部材だけではなく、全てのトラス部材の損傷を回避することが可能となった。一方、橋軸方向に固定となっているHVa30P橋脚上の一支承線上にある道路桁支承8基のみ補強が必要となった。

同様に、多くの損傷箇所が生じる結果となった与島橋2径間部²³⁾においても、橋梁全体系における長周期化・減衰性の付与を検討した結果、道路桁支承の反力分散化により、トラス橋に作用する地震力を軽減することができた。具体的には、既設の道路桁支承（一支承線上に8基）を改造して、鉛直反力のみを支持する支承にするとともに、既設支承間に水平反力を分担するゴム支承（一支承線上に4基）を新たに追加して設置し、機能分離型の分散支承にするというものである。本対策により、鉄道営業線上の工事規模が大きくなるものの、補強が困難な部材の損傷を回避することができた。補強概要を図-13に示す。

一方、前2橋とは振動特性が異なる（固有周期が長

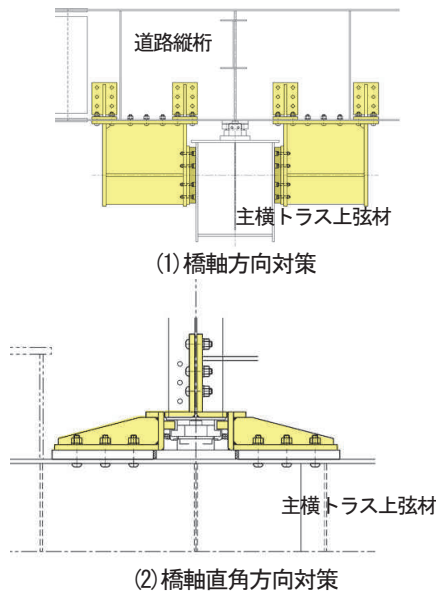


図-12 道路桁支承の補強構造例
Fig.12 Retrofitting for deck girder supports

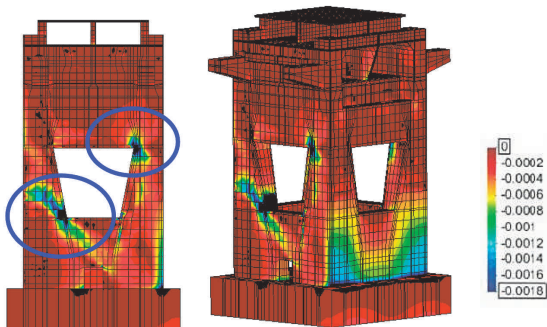


図-14 3次元FEM解析結果（橋軸方向）（与島高架橋）
Fig.14 Analytical result by FEM with 3-dimensional model of Yoshima Viaduct

い）与島橋3径間部²²⁾は、損傷箇所数が比較的少ないことを考慮し、損傷箇所（トラス部材や道路桁支承）を直接補強することにより耐震性の向上を図ることとした。

番の州高架橋トラス部²²⁾は、吊橋アンカレイジを固定端とする挙動により、アンカレイジ近傍のトラス部材の損傷部材数が多くなった。トラス橋の他端部の可動支承側に制震ダンパー（1000kN×2基）を設置することにより、橋軸方向の地震力を軽減し、残った損傷箇所を個別に部材補強することにより、耐震補強策とした。

(4)高架橋

いずれの高架橋においても、柱部及び梁部のせん断補強、道路桁の支承補強や落橋防止システムの設置などが必要となった。

せん断補強は、鉄道が近接する狭隘な現場であることから、施工性を最優先し、基本的に人力作業で施工可能な繊維巻立て工法を採用した。繊維巻立て補強は、炭素繊維巻立て及びアラミド繊維巻立ての施工性や経済性を比較し、採用の検討を行うことを基本としつつ、鉄道

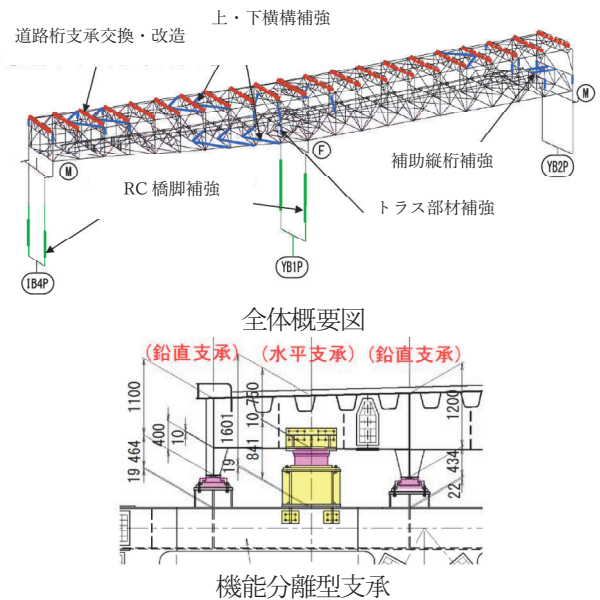


図-13 与島橋2径間部の補強概要
Fig.13 Retrofit plan for Yoshima Bridge

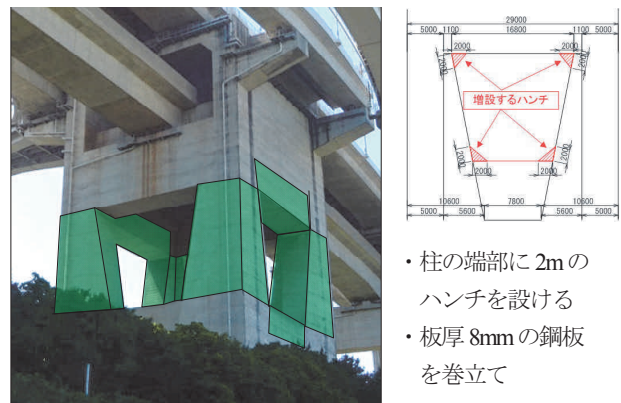


図-15 与島高架橋4P橋脚の補強概要
Fig.15 Retrofit plan for Yoshima Viaduct, 4P pier

架線に近接する柱部や梁部の補強には、非導電性のアラミト繊維巻立て補強を採用した。落橋防止システムのうち、桁かかり長は全ての掛け違い部において最小値以上を有することを確認した。また、落橋防止構造が必要な箇所があったが、桁かかり長が必要桁かかり長の1.5倍以上であったため、多くの箇所を省略した。

与島高架橋4P橋脚は複雑な構造であり、適切な補強を実施するために、より精度よく構造物の耐力を評価することを目的に、3次元のFEM解析を実施した(図-14)。その結果、特に、橋軸直角方向の地震時において、橋軸方向の面の中層柱の上下部に大きな圧縮力が作用し、コンクリート部材の圧壊、せん断破壊への進展が確認される結果となった。そこで、この対策として、隅角部にハンチを増設し圧縮力の伝達を確実にできるようにするとともに、圧縮にも抵抗できる補強策として、鋼板巻立て(図-15)を選定した。

また、与島高架橋の本線に取り付く第1ランプ橋～第4ランプ橋においては、橋軸直角方向への橋桁の過大な変位を抑制するために、横変位拘束構造を設置することにした。支承部は狭隘なところであり、場所によっては、支承補強、落橋防止構造、段差防止構造などの設置にあたり、それらの必要性を適切に評価した。

6. おわりに

最近10年間に実施された明石海峡大橋及び瀬戸大橋の耐震検討について、大規模地震動の設定、耐震性能照査及び補強設計について概要を報告した。現在、平成32年度末の完了を目標に、瀬戸大橋の耐震補強工事が進められている。安全・確実な工事の進捗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を行い、また、西瀬戸自動車道の長大橋をはじめ、一般橋の耐震検討の推進を計画的・効率的に実施していきたい。

謝辞

明石海峡大橋及び瀬戸大橋の耐震性能照査及び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、ご検討いただき、貴重なご意見を頂戴しました。ここに記して深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団:耐震設計指針・同解説、1976.3
- 2) 本州四国連絡橋公団:耐震設計基準・同解説、1977.3
- 3) 本州四国連絡橋公団:明石海峡大橋耐震設計要領(案)・同解説、1988.3
- 4) 本州四国連絡橋公団:明石海峡大橋上部構造耐震設計要領(案)、1989.9
- 5) 本州四国連絡橋公団:来島大橋剛体基礎耐震計算法

(案)、1990.3

- 6) 例えば、日本道路協会:道路橋示方書・同解説、1990.2
- 7) 日本道路協会:「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料、1995.7
- 8) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説、1996.12
- 9) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説、2012.3
- 10) 国土交通省:道路、新幹線の橋梁の耐震補強の推進について、2005.3
- 11) 越野 勝、溝上善昭:大鳴門橋(バックステイ径間部)落橋防止システムの設置、本四技報、Vol.35、No.115、pp.8-13、2010.9
- 12) 真辺保仁、平下忠一、大爺健司:瀬戸大橋トラス橋段差防止工事、本四技報、Vol.34、No.113、pp.12-18、2009.9
- 13) 福永 勸、遠藤和男:耐震補強検討に用いる大規模地震動の設定:本四技報、Vol.33、No.111、pp.18-23、2008.9
- 14) 内閣府中央防災会議:<http://www.bousai.go.jp/index.html>
- 15) 内閣府中央防災会議:東南海、南海地震等に関する専門調査会(第18回)資料、2005.2
- 16) Irikura, K., Miyake, H., Iwata, T., Kamae, K., Kawabe, H., Dalguer: Recipe for predicting strong ground motion from future large earthquake, Proceedings of the 13WCEE、2004.8
- 17) 土木学会:土木構造物の耐震設計法に関する第3次提言と解説、2000.6
- 18) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)、1999.10
- 19) 西谷雅弘、河藤千尋: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、本四技報、Vol.41、No.128、pp.10-17、2017.3
- 20) 福永 勸、遠藤和男:明石海峡大橋の大規模地震動に対する耐震性能照査、本四技報、Vol.33、No.111、pp.24-29、2008.9
- 21) 西谷雅弘、河藤千尋:耐震分科会の取組、本四技報、Vol.42、No.129、pp.58-59、2017.9
- 22) 福永 勸、河藤千尋、遠山直樹:与島橋3径間部、番の州高架橋トラス部の耐震補強設計、本四技報、Vol.40、No.126、pp.2-9、2016.3
- 23) 西谷雅弘、田村 正、平山靖之:櫃石島高架橋トラス部、与島橋2径間部の耐震補強設計、本四技報、Vol.42、No.130、pp.67-74、2018.3
- 24) 西谷雅弘、橋本 龍、遠藤和男:下津井瀬戸大橋PC桁部と櫃石島高架橋の耐震補強、本四技報、Vol.42、No.129、pp.41-52、2017.9
- 25) 遠藤和男、久米昌夫:明石海峡大橋リンク式伸縮装置耐震補強、本四技報、Vol.36、No.117、pp.8-11、2011.9

吊橋ケーブル送気乾燥システムの管理20年

Management of the Dry Air Injection System for Main Cables of Suspension Bridges for 20 years

貴志 友基 Yuki Kishi

保全部 橋梁保全課長

朝倉 義博 Yoshihiro Asakura

保全部 設備課長

概要

吊橋の主ケーブルは、取替えが困難な最も重要な部材であることから確実な防食が必要である。本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という。）の海峡部長大橋では、予防保全を基本とする保全方針により、200年以上の長期にわたる健全性の確保に努めている。このため、本四連絡橋では、ケーブル送気乾燥システム（以下「送気システム」という。）を世界に先駆けて開発し、全吊橋に導入している。

本稿では、導入して20年が経過している送気システムについて、これまでの管理状況、改善事項及び今後の展望について、新設吊橋で初めて採用した明石海峡大橋及び既設吊橋で初めて導入した大鳴門橋での事例を中心に報告する。

Since the main cable of the suspension bridge is the most important member that is difficult to replace, reliable corrosion protection is absolutely necessary. For this reason, Honshu-Shikoku Bridge Expressway(HSBE) developed the first- ever dry air injection system for the main cables in the world, applying the system for the all suspension bridge in HSBE.

This paper reports the status of management, the examples of improvement and the future prospects for the dehumidification systems that have been installed for 20 years, focusing on the cases of Akashi-kaikyo Bridge and Ohnaruto Bridge.

1. はじめに

吊橋の主ケーブルは、吊橋を構成する部材の中で最も重要な部材であり、取替えが困難であることから確実な防食が必要である。従来は、主に塗装により水分を遮断する方法で防食（図-1）してきたが、1989年に供用6年が経過した因島大橋において主ケーブル開放調査を実施した結果、主ケーブル内部の滞水と亜鉛めっき鋼線表面の腐食が確認され（写真-1）、従来の方法だけでは防食が不十分であることが明らかとなった¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

これは、施工時に侵入した雨水が残存するためや、完成後でも年間の気温の差が大きく多雨で高温多湿の我が国の気候のもとでは、温度変化により塗装にひび割れが生じやすく、ひび割れから水分が浸入し、その水分が乾燥しにくく滞水するためと考えられる。新設吊橋の建設にあたり、我が国の気候のもとで有効な主ケーブル防食方法を模索・検討し、主ケーブル内部に乾燥した空気を送り込んで腐食を抑制するケーブル送気乾燥システム（以下「送気システム」という。）を世界に先駆けて開

発し、1997年に初めて明石海峡大橋に採用し、1999年に来島海峡大橋の3橋に採用した¹⁾²⁾⁵⁾⁶⁾⁷⁾。

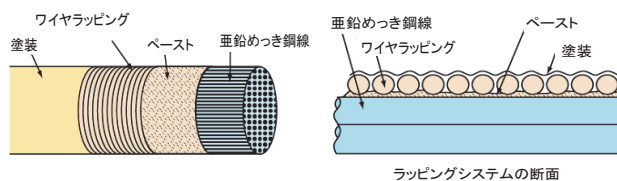


図-1 従来の主ケーブル防食方法

Fig.1 Corrosion protection system for conventional cable



写真-1 因島大橋主ケーブルの開放調査(1989年)

Photo 1 Corrosion on unwrapped cable (Innoshima Bridge)

また大鳴門橋を含む既設6橋の吊橋では、1997年から1999年にかけてケーブル送気を開始しており、2002年からは本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という。）の全ての吊橋において、主ケーブル内の相対湿度が安定した状態となっている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾¹²⁾¹³⁾¹⁴⁾。

本文では、導入後20年が経過した送気システムについて、新設吊橋で初めて採用した明石海峡大橋及び既設吊橋で初めて導入した大鳴門橋のこれまでの管理状況、改善事項及び今後の展望について報告する。

2. 明石海峡大橋送気システム

2.1 明石海峡大橋送気システムの概要

明石海峡大橋は全長3,911m、中央支間長1,991mの世界最長の吊橋である。主ケーブルは直径1,122mmで、直径5.23mmの垂鉛めっき鋼線のワイヤ36,830本を束ねたもので、空隙率はケーブルバンド部で約18%である。

送気システムでは、主ケーブルの気密化対策⁵⁾として、全長約7.8kmのワイヤラッピング上に外部からの水の侵

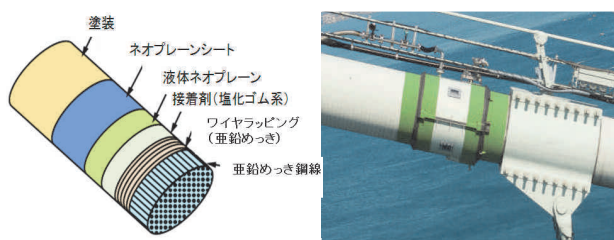


図-2 明石海峡大橋のケーブルラッピングシステム

Fig.2 Cable wrapping system (Akashi-Kaikyo Bridge)

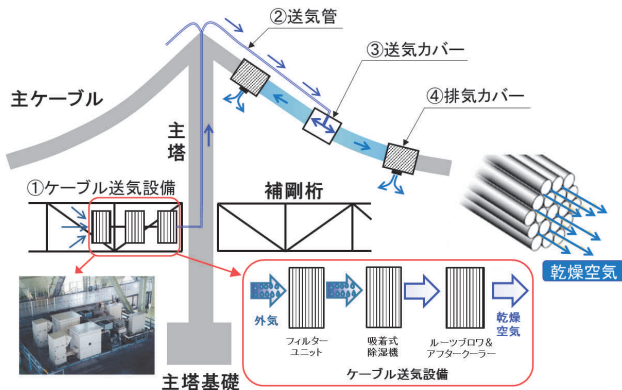


図-3 明石海峡大橋送気システムの概念図

Fig.3 Outline of dehumidification system (Akashi-Kaikyo Bridge)

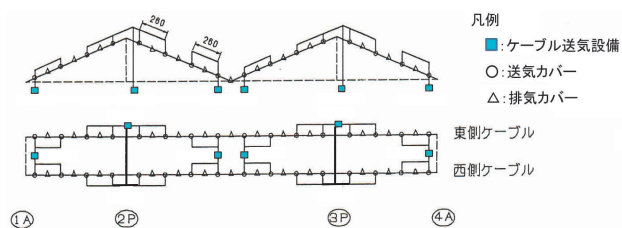


図-4 明石海峡大橋送気システムの機器配置図

Fig.4 Layout of dehumidification system (Akashi-Kaikyo Bridge)

入を防止するケーブルラッピングシステム（ゴムラッピングと塗装）（図-2）を実施している。更に主塔部及び補剛桁に設置された6台のケーブル送気設備で精製された乾燥空気を、ハンドロープに添架した送気管を通して送気カバーへ分配して主ケーブル内へ送り込み、主ケーブルを通過し湿気を帯びた空気は、排気カバーと塔頂・橋台サドル部より排出している（図-3、図-4）。

2.2 ケーブル送気設備の概要

ケーブル送気設備は、フィルターユニット、吸着式除湿機、ルーツブロワ、アフタークーラーで構成している。

海峡部長大橋は海上に設置していることから、海塩粒子が乾燥空気に含まれていれば、長期的に塩分が蓄積され主ケーブルの腐食を促進させる。このため、外気の除塩対策としてラフフィルター、海塩粒子除去フィルター、ULPAフィルターからなる高性能のフィルターユニット（写真-2）を設置している。また、フィルターは、目詰まり状況を外部から確認できるように各フィルター前後の差圧を計測する微差圧計（写真-3）を設置し管理している。



写真-2 フィルターユニット

Photo 2 Filter unit



写真-3 微差圧計

Photo 3 Pressure gauge

除塩された外気は、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シリカゲルローター（以下「ローター」という。）を組み込んだ吸着式除湿機を用いて除湿しルーツブロワで主ケーブルに送気している。除湿機による乾燥空気の精製は、ローターの断面を処理ゾーンと再生ゾーンに分けて次に示す(1)～(4)のサイクルを繰り返すことで連続的かつ安定的に供給できる（図-5）。

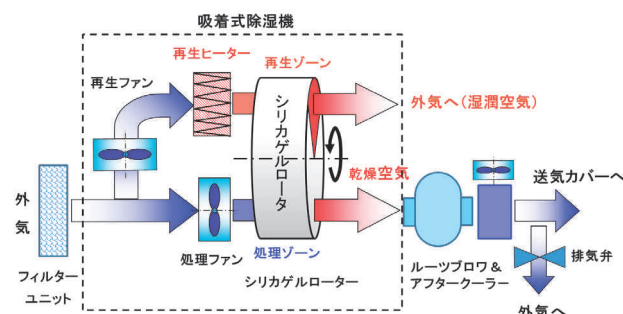


図-5 ケーブル送気設備の処理プロセス

Fig.5 Outline of dehumidification plant

- (1)外気を処理ファンでローターの処理ゾーンを通過(処理)させ乾燥空気を精製する。
- (2)処理ゾーンで湿分を吸着した箇所は、ローターを回転させ再生ゾーンに移動させる。
- (3)再生ヒーターで加熱した熱風を当て、湿分が吸着した箇所を乾燥させる。
- (4)乾燥させた箇所はローターを回転させ再び処理ゾーンに移動させる。

3. 主ケーブルの乾燥状況

3.1 管理目標湿度

鋼材の腐食量と相対湿度の関係を文献や試験により確認した結果(図-6)、相対湿度60%以下ではほとんど腐食が進行しないことを確認した。

そこで相対湿度60%以下を確実に保つために、主ケーブル内の乾燥空気の管理目標値は相対湿度40%とした。ただし塩分濃度が大きい場合は、相対湿度60%以下でも腐食が進む結果もあるため、前述の除塩対策が重要となる。

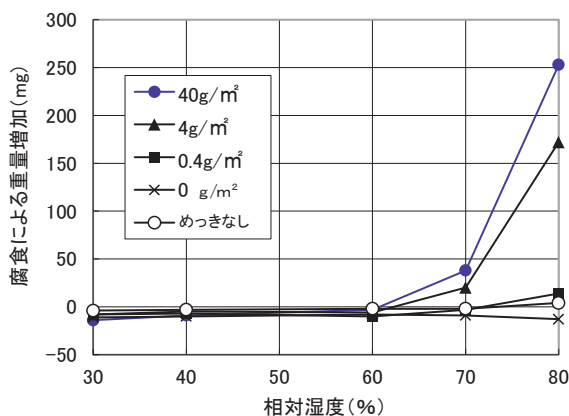


図-6 亜鉛めっき鋼線の塩分・腐食・相対湿度の関係¹⁾

Fig.6 Results of critical humidity test by volume of salt included

3.2 初期の乾燥状況

明石海峡大橋では当初から主ケーブル内の温湿度を計測するセンサを上り線側3P-4A側径間の格点250~268に

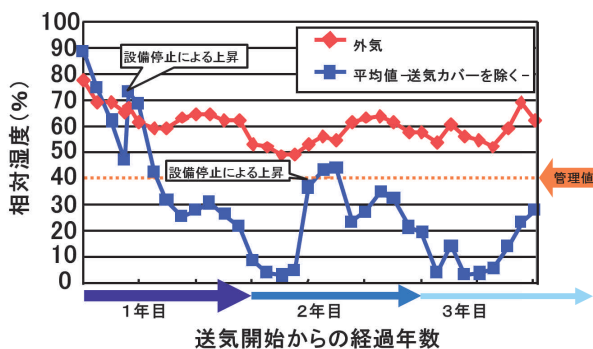


図-7 主ケーブル内相対湿度測定結果(導入初期)

Fig.6 Humidity in main cable

設置し自動計測していた。この区間で試験送気を実施し、送気開始からの湿度変化を約3年間調査した(図-7)。

その結果、送気開始から約半年で管理目標値の相対湿度40%以下の乾燥状態に達することが確認できた。また、ケーブル送気設備を停止すると相対湿度が急激に上昇するものの、再開するとすぐに低下することが確認できた。これは主ケーブル内を一度乾燥すると外部からの水分浸入が少ないため、送気の再開で早期に乾燥状態に移行できることを示している。

3.3 年間の乾燥状況

自動計測の温湿度は、毎日6時に計測されたデータを用いている。これは1日のうち、最も相対湿度が高くなるのは早朝6時といわれているためである。自動計測で得られた温湿度データの推移の一例を図-8に示す。この図から温度の高い夏季に相対湿度が高くなっていることが確認できる。

なお、計測の不具合、夏季における空気漏れ、吸気口の日詰まり等の送気システムの不良などによって、相対湿度が管理目標値の40%を大きく超える日も見られるが、順次補修による対応を実施することで、管理目標値以下に収まっている。

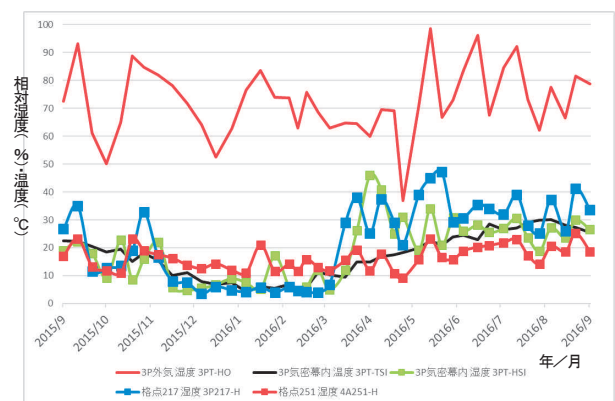


図-8 温湿度データの推移(AM6:00の平均値)

Fig.8 Temperature and humidity in main cable

3.4 1日の乾燥状況

自動計測で得られた夏季と冬季の1日の温湿度データの推移の一例を図-9及び図-10に示す。相対湿度の日変化は、温度が高くなる昼間は湿度が低下し、温度が低くなる夜間に湿度が上昇する。また相対湿度の変化は夏季が大きく、冬季は低湿度でほとんど変化していない。これは、夏季では外気中の水分が多く除湿能力に余裕がないため、主ケーブル内の水分が冬季よりも多く、温度低下に伴い相対湿度が上昇するためである。逆に、冬季では外気中の水分が少なく、除湿能力に余裕があると推定される。なお夏季の相対湿度の上昇対策については、プレクーラーの追加等の対策による除湿能力の向上と経済化運転ができており、詳細については6.2で述べる。

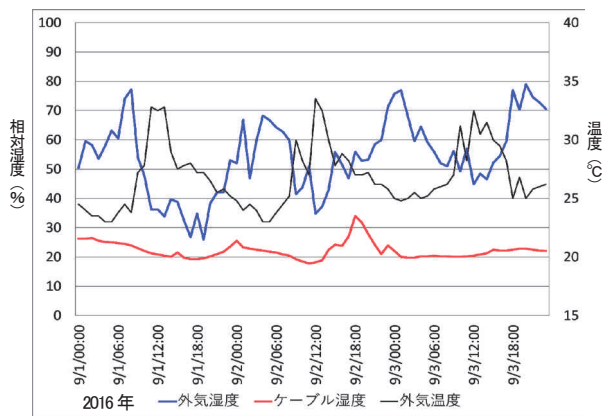


図-9 夏季の相対湿度の変化

Fig.9 Changes in summer relative humidity

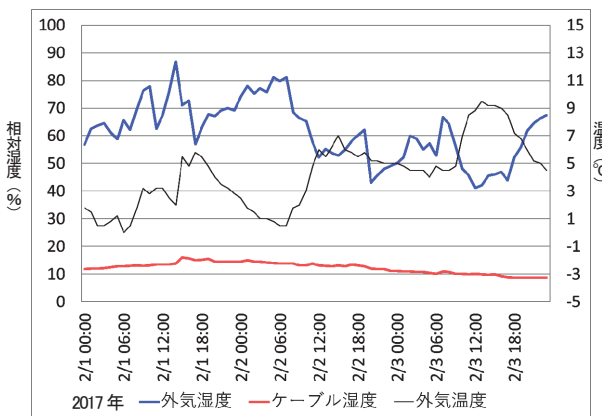


図-10 冬季の相対湿度の変化

Fig.10 Changes in winter relative humidity

4. 点検管理

4.1 点検

現在、明石海峡大橋の定期点検では主ケーブルの点検を年4回（1回/3ヶ月）実施しており、ここで送気カバーや排気カバーの状態や空気漏れを確認している。また、主ケーブル全体の温湿度状況を年1回確認している。更に主ケーブル下面などに対しては、ケーブル作業車を用いた近接点検を5年ごとに実施している。

設備点検は、主ケーブル上も含めた設備・機器類のほとんどを対象として年1回実施している。ただし、除湿能力の確認は月1回、フィルターの差圧確認、ルーツブロワの軸受給油脂、制御盤の表示灯確認は6ヶ月に1回の頻度で点検を行っている。

4.2 乾燥状況の管理

明石海峡大橋では建設当初から一部の区間で自動計測用センサによるモニタリングを実施するとともに、夏季の晴天が続く日に年1回排気カバーを中心に点検員が主ケーブル上から各排気カバー内の湿度計測を手動で計測し（写真-4）、乾燥状況の確認を行っている。また、

ケーブルバンド及び送排気カバー等からの空気漏れの状況を目視確認や石鹼水を使用して点検を行っている（写真-5）。



写真-4 温湿度手動計測

写真-5 空気漏れ点検

Photo 4 Manual temperature and humidity measurement

Photo 5 Air leakage inspection

5. 主ケーブル開放調査

供用後約10年が経過した2008年1～2月に、水分が最も集まりやすい中央径間中央付近のうち、西側（上り線側）主ケーブルの排気カバー部1.1m及び一般部1mの開放調査を実施した（写真-6）。

調査の結果、水分がなく完全に乾燥した状態であり、表層の広範囲に白さびが見られたものの、全体として素線は良好な状態を保っており、表層の白さびを除去したところ亜鉛めっきの光沢が見られた。内部環境を調べた結果、主ケーブル下面で塩素イオン（Cl⁻：0.1～0.16g/m²）及び硫酸イオン（SO₄²⁻：0.02～0.3g/m²）が他より多く検出されたが、2003～2004年度に実施した腐食試験において、腐食が促進しなかったレベル（湿度：40%、Cl⁻：0.1g/m²、SO₄²⁻：0.5g/m²）⁹であり、実橋でも腐食がほとんど進んでいないことから、影響がほとんどないレベルの内部環境であると考えられる。

なお、2018年度に供用後21年が経過した状況について、同じ場所での主ケーブルの開放調査を実施する予定である。



写真-6 明石海峡大橋主ケーブル開放調査(2008年)¹³⁾

Photo 6 Cable open survey of Akashi-Kaikyo Bridge

6. 明石海峡大橋での主な改善事項

6.1 塔頂サドル部の防湿対策

主塔の頂上に位置する塔頂サドル部の主ケーブルについては、塔頂サドルカバー内に納まっており、風雨が直接あたる状態ではないため、当初はサドル上部の開放部分を排気口としていた。しかし、サドルカバー内は密閉させることが困難であり、排気により室内を乾燥することができないことが判明した。そこでサドル上面を防湿シートで覆って排気口を設置し、主ケーブルを乾燥空気で満たし防食している（写真-7）。

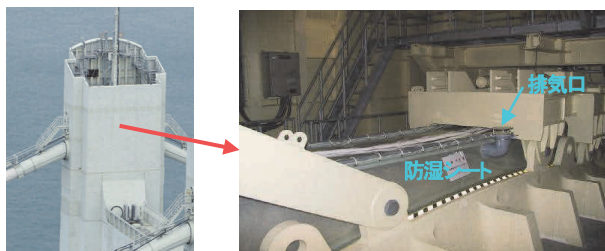


写真-7 塔頂サドル部の防湿シートと排気口

Photo 7 Moisture proof sheet and exhaust port at top of saddle section

6.2 ケーブル送気設備の経済化運転の取組

ケーブル送気設備の稼働後に行った経済化運転の取組を以下に述べる。

(1)改造1：乾燥空気の再循環

ケーブル送気設備で精製させる乾燥空気量と各送気カバーから主ケーブルに送気される送気量には差があり、余分な乾燥空気はケーブル送気設備出口にある吐出弁から外気に放出していた。そこで、除湿能力を高めるために、放出していた乾燥空気を戻し管で吸湿式除湿機ローターの処理ゾーン前へ再循環させ、夏季の除湿効率を向上させた（図-11）。

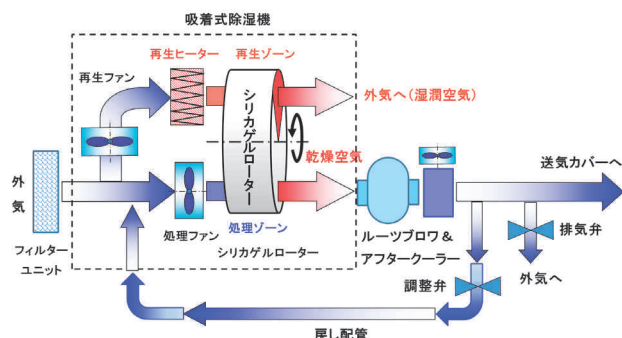


図-11 乾燥空気の再循環による改善

Fig. 11 Improvement by recirculation of dry air

(2)改造2：送気量の低減

主ケーブル内の乾燥状態が確認されたため、経済化運転のために、主ケーブルへの送気量低減を図った。これ

に伴いケーブル送気設備の送気能力の低減が可能となり、中央径間と側径間の補剛桁上にあるルーツフロア（4台）を小型化（22kW→5.5kW）するとともに、2P・3P主塔部の各2台のルーツフロアを共有し、各1台で運用することとした。2006年から設備改良を踏まえて送気圧力と送気流量を減少させて、除湿状況と経済性の確認を行い、2007年1月からケーブル送気設備の稼働台数を8台から6台に減少して運用を行っている。その結果、従前に比べ約60%の電気料金を削減することができた。

(3)改造3：プレクーラーの追加

既設の吸着式除湿機は露点温度が低い冬季でも管理目標値以下の乾燥空気を精製することができるが、市場で多く普及しているヒートポンプを用いた冷却式除湿機に比べ、同じ条件では消費電力が約10倍¹¹⁾大きくなる欠点がある。一方、冷却式除湿機は外気をヒートポンプにより露点温度以下に下げ、結露により除湿するため、吸着式除湿機に比べ消費電力が少なく効率的な運転が可能となるが、露点温度が低い冬季は除湿機能に限界がある。

そこで、明石海峡大橋6台のケーブル送気設備のうち1台を対象に、既設の吸着式除湿機の手前にプレクーラー（冷却式除湿機）を設置（図-12）し、更に吸着式除湿機の消費電力の大部分を占める再生ヒーターの設定温度を下げ、乾燥空気の相対湿度を管理目標値以下とする経済化運転の実橋実験を実施した。プレクーラー運転前後の送気カバーの相対湿度とケーブル送気設備の消費電力量の推移を図-13に示す。

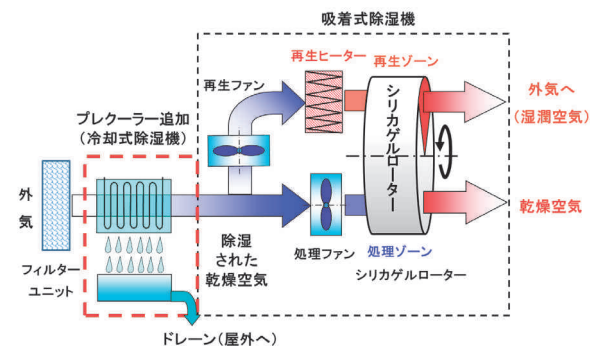


図-12 プレクーラーの追加

Fig. 12 Addition of the pre-air conditioner

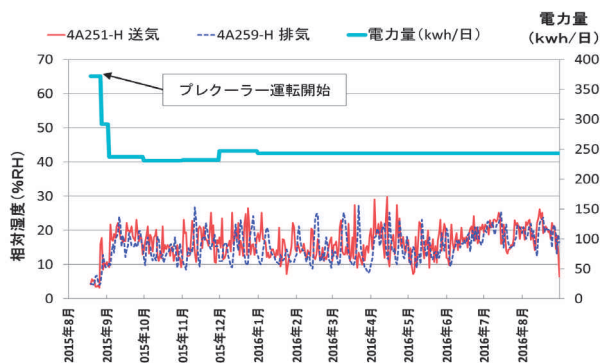


図-13 送気相対湿度と消費電力の推移

Fig. 13 Relative humidity and power consumption

送気カバーの相対湿度は、高温多湿時期で除湿能力が必要となる夏季（7～9月）及び露点温度が低下し除湿が困難となる冬季においても管理目標値以下を満足できることを確認した。また、ケーブル送気設備の電力消費量は、約3割削減（380kWh/日→250kWh/日）できた。この結果を踏まえ、残り5台のケーブル送気設備の改造を実施し、全6台で従来に比べ約30%の電気料金の削減ができています。今後はプレクーラーの運転条件や再生ヒーター温度等の調整、年間を通じた送気カバーの相対湿度と消費電力量の推移を観察しながら、更に効率的な送気システムの運転手法の確立を目指していく予定である。

7. 大鳴門橋送気システム

7.1 大鳴門橋送気システムの概要

大鳴門橋は全長1,629m、中央支間長876mで1985年に供用した吊橋であり、本四連絡橋の中で唯一太平洋に面した場所に位置し、最も腐食環境が厳しい橋梁である。主ケーブルは直径840mmで、直径5.37mmの亜鉛めっき鋼線のワイヤ19,558本をケーブルバンド及びワイヤラッピングで束ねた上に塗装したもので、空隙率はケーブルバンド部で約18%である。

1991年に供用6年が経過した大鳴門橋において、主ケーブル開放調査を実施した結果、因島大橋と同様に主ケーブルの亜鉛めっき鋼線表面の腐食が確認された。このため、既設橋で初めて送気システムを導入した。

送気システムでは、主ケーブルの気密化対策として、全長約3.3kmある主ケーブルの旧塗膜上に柔軟性塗装を実施している。更にアンカレイジに設置した4台のケーブル送気設備で精製された乾燥空気を、ハンドロープに添架した送気管を通して送気カバーへ分配して主ケーブル内へ送り込み、主ケーブルを通過し湿気を帯びた空気は、排気部（排気管及び排気カバー）及び塔頂・側塔・橋台サドル部より排出している（図-14）。

送気システムは、1994年から1996年にケーブル送気の試験施工を経て、供用後12年経過した1997年度に太平洋側の送気を、1999年度に瀬戸内側の送気をそれぞれ開始しており、送排気の状態を確認しながら運用しているところである。

7.2 防食効果の検証

大鳴門橋では主ケーブル内の温湿度を計測するセンサを太平洋側と瀬戸内側に設置し自動計測しているが、一部モニタリング箇所において雨天に連動して排気空気の相対湿度が上昇することが温湿度計測のデータにより確認されていた。また、自動計測用のセンサ位置を移設することによって計測値が大きく変化することも確認されていた。そこで、モニタリングによって高湿度が頻繁に観測される5Aアンカレイジ部付近で主ケーブルの開放

調査を2009年に実施した。

その結果、送気開始後約12年が経過した主ケーブル表面は、送気システム導入前の状況と変化は無く、内部の滞水も確認されなかった（写真-8）。また、写真-9のようにケーブルバンドのシーリングを一部除去し、その隙間から簡易的に主ケーブル表面を調査した。ここはモニタリングで常に高湿度が観測されていた場所であったが、目視による確認の結果、主ケーブル表面は健全な状態であった。

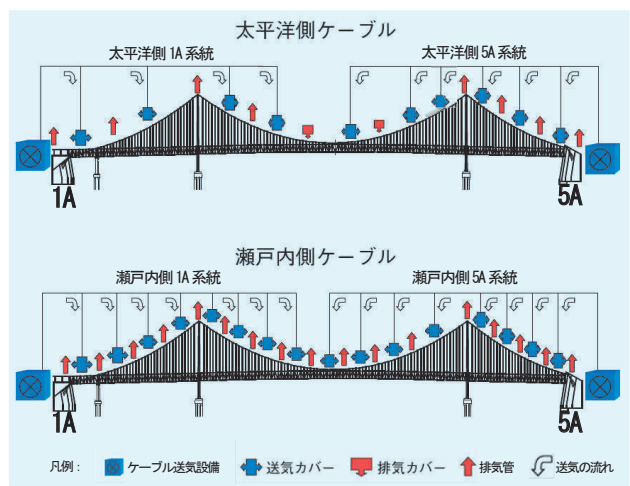


図-14 大鳴門橋送気システムの概念図

Fig. 14 Concept of dehumidification system (Ohnaruto Bridge)



写真-8 開放時の主ケーブル状況 写真-9 バンド部の状況¹⁴⁾

Photo 8 Cable status when opened Photo 9 Status of the band section

8. 大鳴門橋での主な改善事項

8.1 送気配管の更新

大鳴門橋はアンカレイジ内に設置されたケーブル送気設備で精製した乾燥空気を主ケーブルのハンドロープに取り付けた送気管を通じて、送気カバーから主ケーブル内へ送り込んでいる（図-14）。大鳴門橋の送気管は当初ゴム系の材料を使用していたが、約16年が経過し経年劣化で部分的に割れが発生し空気漏れが見られたため（写真-10）、送気管の更新が必要と判断した。

このため、2013年度から2017年度にかけて送気管をゴム管からアラミド外装ポリエチレン管に取り替えた（写真-11）。今後は、ケーブルバンド部の劣化したシール補修に着手して、気密化を維持する計画である。

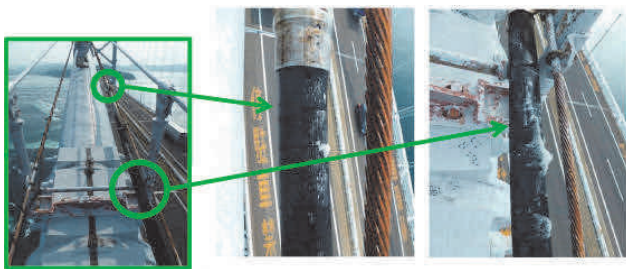


写真-10 大鳴門橋の送気管の劣化状況

Photo 10 Degradation situation of supply pipe (Ohnaruto Bridge)



写真-11 大鳴門橋の送気管の取替状況

Photo 11 Replacement status of supply pipe (Ohnaruto Bridge)

8.2 送気カバーの増設と送・排気方式の改良

従前の大鳴門橋送気システムの主ケーブルにおける乾燥空気の排気は、空隙率が小さいケーブルバンド上部に設置されたシステム導入時の排気管より行われており（写真-12）、主ケーブル内を通過した空気がケーブル全周から円滑に排気しにくい構造となっていた。そこで、送気カバーを増設するとともに、主ケーブル全周にカバーとの隙間があり、空気を排気しやすい構造を持つ送気カバーを一部排気カバーに変更して、排気管は閉塞する改良を行い、送気環境の円滑化を図った。

送気及び排気カバーの変更箇所は、最初に送気圧力が最も高い太平洋側5A系統で試行することとし、2016年に相対湿度の高い中央径間側の塔頂近傍に送気カバーを増設（写真-13）し、更に送気カバー2か所を排気カバーに変更（図-15）して効果を確認した。その結果、送気量は従前の約1.3倍の増加が確認され、今後送気カバー増設の効果も含めてモニタリングを継続し、評価を進める予定である。

また、送気カバー増設時にラッピングワイヤのアンラッピングに併せて、主ケーブル腐食状況調査を行った（写真-14）。主ケーブル素線内部の確認は、八方位の位置にクサビを打ち込み、内層ケーブル7層目までの目視観測を行った（写真-15）。



写真-12 既設の排気管
Photo 12 Existing exhaust pipe



写真-13 増設送気カバー
Photo 13 Added injection cover

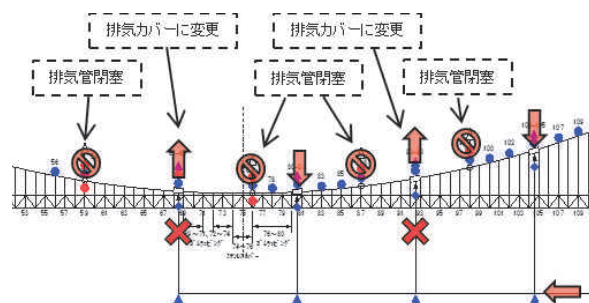


図-15 排気カバー変更箇所（太平洋側5A系統）

Fig. 15 Exhaust cover change point

主ケーブル内部の状況は、赤さび・点さびが表層から3～5層程度までであり、送気システム導入前の状況と大きな変化は見られないことから、送気システムによる一定のさび抑制効果が発揮されていたと推測できる。



写真-14 ペースト除去後の主ケーブル表面（ケーブル下面）

Photo 14 Unwrapping of main cable (Cable bottom)



写真-15 クサビ打込後の内部素線状況

Photo 15 Inner layer of wiew

8.3 塔頂サドル部の除湿機設置

大鳴門橋の塔頂サドルカバーの内は、写真-16のように空間が狭く、明石海峡大橋等で実施されているサドル部上面への密閉カバーの設置が困難な状況である。また、塔頂サドルカバーには、直径1cm程度の水抜き穴が数か所とマンホール部パッキンに隙間があり、強風かつ降雨時にこれらの隙間から雨水が浸入していた。そこで、塔頂サドルカバー内の気密化対策を行い、市販の除湿機を設置した。

気密化対策として、水抜き穴に逆流防止用のふたを設置する（写真-17）とともに、マンホールの隙間に柔軟性のあるパッキンを追加して雨水の浸入を防止した（写真-18）。また、塔頂サドルカバー内には、サドル内部

の空間体積を踏まえ、試験的に市販の冷却式除湿機を設置し、ドレーンはホースで水抜き穴から外部に排出した。

除湿機設置前後の塔頂サドル内の相対湿度の推移を図-16に示す。除湿機設置前は相対湿度が比較的高い傾向であったが、除湿機設置後はおおむね40%以下に改善でき、台風時でも一時的に高湿度の状況になるが直ちに低湿度に戻ることも確認できた。引き続きモニタリングを継続し、その効果を検証していきたい。



写真-16 大鳴門橋サドル内部の状況

Photo 16 Situation inside of saddle (Ohnaruto Bridge)



写真-17 水抜き穴の対策



写真-18 マンホールの対策

Photo 17 Measures against drain holes Photo 18 Measures for manholes

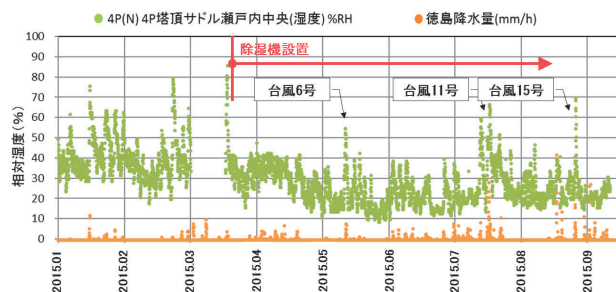


図-16 大鳴門橋塔頂サドル内の相対湿度の推移

Fig. 16 Transition of the relative humidity in the top saddle

9. おわりに

本稿では、導入されてから20年が経過した送気システムについて、明石海峡大橋及び大鳴門橋での導入効果及び改善事例を紹介した。送気システムは本四連絡橋の全吊橋で稼働中であり、モニタリングデータや変状データを基に設備改良や補修を実施している。その結果、主ケーブル内の相対湿度はおおむね管理目標値を満足しており、主ケーブルの健全性は維持されているものと考えられる。なお、未だに一部に管理目標値を上回る箇所も

存在することから、現在も引き続き設備改良や補修を進めているところである。またモニタリングについては、大鳴門橋を除いて自動計測を実施している範囲は主ケーブルの一部に限られている状況である。現在、明石海峡大橋をはじめ、本四連絡橋の全吊橋において、主ケーブル全体をモニタリングできるように排気部への自動計測用センサの増設を進めているところである。

今後は、ケーブルラッピングシステムにおける高耐久性材料による気密化手法の開発、省エネ仕様で経済性が高く、維持管理がしやすい設備の検討と更新、合理的な送気システム点検手法の開発、定期的な開放調査による送気システムの有効性検証等の取組を行い、200年以上にわたって吊橋の健全な状態を確保する万全な維持管理に努めていきたい。

参考文献

- 1) 古屋和彦：送気乾燥による吊橋ケーブル防食試験、本四技報、Vol.21、No.84、pp.12-18、1997.10
- 2) 佐伯彰一、河藤千尋：送気による吊橋ケーブルの防食、土木学会誌、Vol.83、pp.11-13、1998.1
- 3) 古屋和彦、北川 信、中村俊一、鈴木恵太、聖生守雄：吊橋ケーブルの腐食機構に関する研究、土木学会論文集、No.637/VI-45、pp.103-114、1999.12
- 4) 古屋和彦、北川 信、中村俊一、鈴木恵太、聖生守雄：暴露試験による吊橋ケーブル防食法の防食性能評価、土木学会論文集、No.637/VI-45、pp.15-28、1999.12
- 5) 下村稔、杉山剛史、花井拓：明石海峡大橋のケーブル防食システム、本四技報、Vol.22、No.86、pp.63-71、1998.4
- 6) 平野信一：ケーブル一般部の新防食工法、橋梁と基礎、No.5、pp.35-36、1999.5
- 7) 北川 信、古屋和彦、中村俊一、鈴木恵太：吊橋ケーブル送気乾燥システムの防食性能に関する研究、土木学会論文集、No.672/VI-50、pp.145-154、2001.3
- 8) 上村博文、池田秀継：吊橋ケーブル送気乾燥システムにおける腐食物質調査および改善等の検討、本四技報、Vol.28、No.103、pp.14-19、2004.9
- 9) 花井 拓、寺下孝男、熊井貴弘：瀬戸大橋ケーブル送気システムの改良とその効果、本四技報、Vol.31、No.108、pp.34-40、2007.3
- 10) 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.102、pp.4-48、2009.3
- 11) 松葉真人、小野祥史：来島海峡大橋ケーブル送気設備の改善と効果、本四技報、Vol.37、No.119、pp.16-22、2012.9
- 12) 門田整達、竹口昌弘：瀬戸大橋ケーブル送気システムの改善経緯と今後の課題、本四技報、Vol.41、No.127、pp.16-22、2016.9
- 13) 大谷康史：200年以上にわたり利用される橋の実現を目指す本州四国連絡橋、橋梁と基礎、pp.83-86、2017.8
- 14) 貴志友基、朝倉義博：200年を支える吊橋ケーブル送気乾燥システム、橋梁と基礎、pp.42-45、2017.11

本四連絡橋 海中基礎防食のあゆみ

The history of corrosion protection for underwater foundations of Honshu-Shikoku Bridges

鎌田 将史 Masafumi Kamata

保全部 橋梁保全課

貴志 友基 Yuki Kishi

保全部 橋梁保全課長

岡本 豊 Yutaka Okamoto

保全部 橋梁保全課長代理

概要

本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という。）における海中基礎は、水深が深く潮流の速い場所に構築する必要があり、瀬戸大橋建設において設置ケーソン工法が開発され、型枠として鋼製ケーソンが用いられた。その後、明石海峡大橋では鋼製ケーソン表面に腐食しるを考慮した設計、多々羅大橋・来島海峡大橋では塗膜と電気防食による防食と、鋼製ケーソンの健全性を維持するよう設計思想が変化している。また、瀬戸大橋では電気防食・電着被膜による防食工事が順次行われている。

本稿では、本四連絡橋の海中基礎防食の変遷を瀬戸大橋での防食事例と交えて取りまとめる。また、耐震性能を確保するため防食工事を行っている大鳴門橋の多柱基礎での事例についても、合わせて報告する。

It was necessary to build the foundations of Honshu-Shikoku Bridges in the ocean. The laying-down caisson method was developed for construction of underwater foundations of the Seto-Ohashi Bridges. In this method, a steel caisson was used as a formwork. At that time, the steel caisson's corrosion prevention was not considered. Thereafter this method was also used for construction the Akashi-Kaikyo Bridge, Tatara Bridge and Kurushima-Kaikyo Bridges. These caissons are maintained in a sound condition by increasing plate thickness of the steel caisson or installing the electric protection system. Furthermore, the corrosion protection by the electric protection or the electro deposit method are being applied to the Seto-Ohashi Bridges' caissons.

This paper reports the transition of mind to maintain a steel caisson's condition and the corrosion protection work at Seto-Ohashi Bridges. In addition it reports the work of multi-column foundation using steel pipes at Ohnaruto Bridge.

1. はじめに

本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という。）では、海峡部を横断するという立地条件から、水深が深く潮流の速い海中に主塔・アンカレイジの基礎を構築したものが多数ある。その先駆けとなった瀬戸大橋の建設においては、迅速かつ正確な海中基礎の構築のため、海底面を掘削し、型枠として鋼製ケーソンを据え付け、その中にコンクリートを打設し基礎を築く「設置ケーソン工法」

（写真-1、写真-2）が開発された。その後の明石海峡大橋、多々羅大橋及び来島海峡大橋の海中基礎構築においても同工法が採用された。一方で、瀬戸大橋の鋼製ケーソン設置後約10年で表面に著しい腐食や孔食が見られたことから、鋼製ケーソンの消失により海水が浸入し、鋼製ケーソン内側の鋼材が腐食膨張することで内部のコンクリートの割れ等が生じて剛体基礎としての一体性を失う懸念があることを受け、明石海峡大橋以降の鋼製

ケーソンは保護材として防食を考慮する設計がなされるようになった。また、瀬戸大橋の鋼製ケーソンについても長期の防食性能を確保するため、電着被膜形成や電気防食による防食工事が順次行われているところである。

設置ケーソン工法ではないが、大鳴門橋で採用している多柱基礎では、建設時の海水汚濁防止・基礎杭の型枠を主たる目的として、鋼製のケーシング管及び内鋼管



写真-1 えい航中の鋼製ケーソン（瀬戸大橋）
Photo 1 Towing of steel caisson (Seto-Ohashi Bridges)

(以下「多柱基礎鋼管」という。)が用いられている。その後のレベル2地震動を用いた耐震照査において、多柱基礎鋼管を構造部材として加味し、照査を満足する評価をしている。鋼製ケーソンと同様に、基礎杭内部のコンクリートの保護の観点も含め、多柱基礎鋼管の健全性を保つ必要があり、順次防食工事を実施している。

本稿では、海中基礎外面に鋼製部材を用いた海中基礎を対象に、建設時における防食仕様の変遷、現在実施している防食工事及び点検・調査と、今後の計画について取りまとめる。

2. 海中基礎の防食思想の変遷（建設時仕様）

各海中基礎の建設時の防食仕様を表-1に示す。また、各基礎の概要は次に示すとおりである。

2.1 瀬戸大橋建設時の鋼製ケーソン

瀬戸大橋では、1980年から1984年にかけて11基の海中基礎が設置ケーソン工法により施工されている。この時の鋼製ケーソンの位置づけは、プレパックスドコンクリート施工時の静水域・施工安定性の確保及びコンクリート打設時の型枠であり、コンクリートの品質を下げないための海生物発生対策として防汚塗装（無機ジンクリッチペイントと有機スズ）が鋼製ケーソン内面の飛沫・干満帯部になされているものの、大部分は無機ジンクリッチプライマーのみである。

2.2 大鳴門橋の多柱基礎鋼管

大鳴門橋の多柱基礎は、3P、4P主塔基礎の各塔柱下部中心にある計4本のφ7m杭と、2Pを含む計44本のφ4m杭で構成される（写真-3）。多柱基礎は、鳴門海峡の厳しい海象気象条件下における工事の安全性・経済性の確保と、渦潮や水産資源等の環境保全の観点から採用され、海上足場と多柱基礎鋼管を用いて施工されている（写真-4）。多柱基礎鋼管は、基礎杭施工時に周辺海域と作業空間の隔離による汚濁防止とコンクリート打設時のドライアップや型枠を目的として用いられていることから



写真-2 海中コンクリート打設（骨材投入 瀬戸大橋）
Photo 2 Casting aggregates of underwater concrete (Seto-Ohashi Bridges)



写真-3 多柱基礎外観（大鳴門橋）
Photo 3 Multi-column foundation (Ohnaruto Bridge)

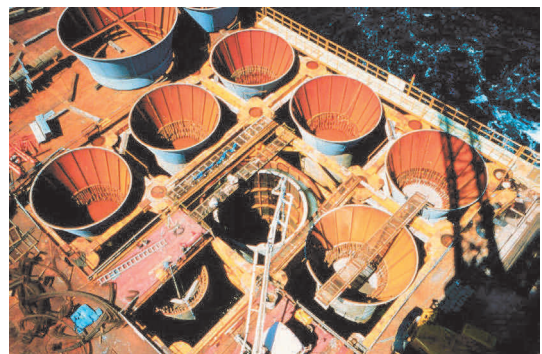


写真-4 海上足場及び多柱基礎鋼管（大鳴門橋）
Photo 4 Steel pipe and scaffolding (Ohnaruto Bridge)

表-1 鋼製ケーソン・多柱基礎鋼管の建設時の防食仕様

Table 1 Originally concept of corrosion protection for steel caisson or steel pipe

	大鳴門橋	瀬戸大橋	明石海峡大橋	多々羅大橋、来島海峡大橋			
	2P,3P,4P (多柱基礎鋼管)	HB2P,3P IB2P,3P,4P BB2P,3P,4A,5P,6P,7A	2P,3P	来島4A		多々羅2P,3P 来島3P,5P	
設置年	1977~78年	1980~84年	1989年	1992年		1993~94年	
防食仕様	塗装等	塗装等	塗装等	塗装等	電気防食	塗装等	電気防食
飛沫・干満帯	アルミ溶射	無機ジンクリッチプライマー	超厚膜型エポキシ樹脂	超厚膜型エポキシ樹脂+ふっ素樹脂	電気防食	超厚膜型エポキシ樹脂+ふっ素樹脂	電気防食
T.P.-1m			無機ジンクリッチプライマー			無機ジンクリッチプライマー	
-2m							
-3m							
-4m							
-5m							
~							
底部							

構造部材としていない。ただし、完成後も基礎杭の保護材として存置することから、表面に180 μ mのアルミ溶射がなされている。

2.3 明石海峡大橋の鋼製ケーソン

明石海峡大橋の主塔基礎においても設置ケーソン工法を採用しており、鋼製ケーソンは2基とも1989年に沈設されている（写真-5）。瀬戸大橋と同様に海中コンクリート打設の型枠の位置づけであるが、鋼製ケーソン外壁（以下「スキンプレート」という。）の板厚は、ケーソン全体の経済性を考慮しながら、可能な限り腐食しろを設けた20mmとなっている。また、腐食環境のより厳しい飛沫・干満帯部は、現地にて素地調整を行い、超厚膜型エポキシ樹脂塗料による防食塗装がなされている。また、設置から3年弱が経過する1991年12月に、瀬戸大橋と合わせてスキンプレートの腐食状況の調査を実施するなど、維持管理段階を見据え、鋼製ケーソンを維持していく思想に変化している。

2.4 多々羅大橋・来島海峡大橋の鋼製ケーソン

明石海峡大橋に続き、1992年から1994年にかけて、多々羅大橋及び来島海峡大橋で鋼製ケーソンが設置されている。先行して沈設した来島海峡大橋4Aの鋼製ケーソンは、製作の段階で飛沫・干満帯部では超厚膜型エポキシ樹脂及びびふっ素樹脂塗料による防食、海中部では流電陽極方式による電気防食が施されており、その後の鋼製ケーソンでは、上記に加えて海中部にタールエポキシ樹脂塗料による塗装が施されている（写真-6）。後述するが、これら対策により2010年と2013年の鋼製ケーソンの壁面調査においても、良好な結果を得ている。

3. 実施中の防食工事

3.1 瀬戸大橋海中基礎防食

(1) 背景

鋼製ケーソン設置後約10年が経過し、スキンプレートに腐食や局部的で深い孔状の腐食である孔食（写真-7）が多数確認された。孔食の中には、鋼製ケーソンを貫通し、内部のコンクリートの露出に至るものも確認された。そこで、孔食の閉塞と鋼製ケーソンの防食を目的に「電着工法」を中心とした防食工事に着手している。

(2) 電着工法の概要

電着工法の概念図を図-1に示す。電着工法では、鋼製ケーソンを陰極とし、向かい合って設置した陽極との間に微弱な直流電流を一定期間流すことで、海水の電気化学反応により陰極側に CaCO_3 （炭酸カルシウム）や Mg(OH)_2 （水酸化マグネシウム）を析出させ表面を被覆する防食工法である。電着被膜は、通電させる電流密度を適正に設定することで緻密な構造で形成されることから、孔食部の閉塞に加えて高い遮水能力と付着力を持つ。



写真-5 えい曳航中の鋼製ケーソン（明石海峡大橋）
Photo 5 Towing of steel caisson (Akashi-Kaikyo Bridge)



写真-6 防食済みの鋼製ケーソン（来島海峡大橋）
Photo 6 Setting of steel caisson (Kurushima-Kaikyo Bridge)

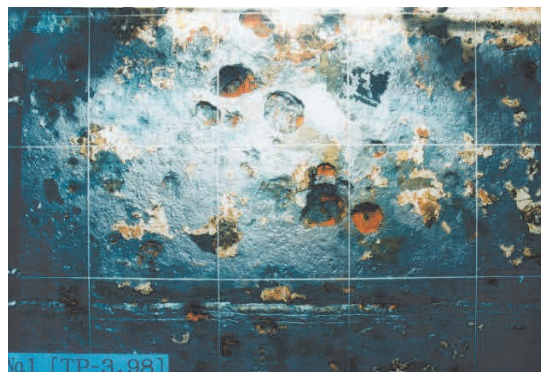


写真-7 孔食の例（瀬戸大橋）
Photo 7 Situation of hole corrosion (Seto-Ohashi Bridges)

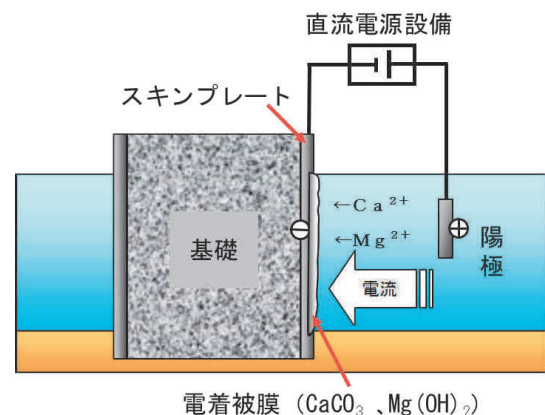


図-1 電着工法の概念図
Fig.1 Concept of electro deposit method

また、pH10程度のアルカリ性であることから、スキンプレートを不動態環境とすることも期待できる²⁾。

(3) 防食工法の変遷

電着工法は1999年度の櫃石島橋HB3Pを皮切りに施工を開始した。深さ方向の適用範囲は、海水が必要なことから海水浸せき率80%となるT.P.-1.0m以深としている。本工法の評価は、電着被膜本体では主に遮水性（細孔半径で評価）や水素イオン指数（pH）、防食性能ではスキンプレートの腐食速度によりそれぞれ確認を行い、いずれも良好な結果を得ている¹⁾。

一方で、海中部に比べ腐食環境が厳しい飛沫・干満帯部においても、腐食や孔食が多数確認されている。そこで、2009年度より同じく櫃石島橋HB3Pにおいて試験施工を実施し、先行する海中部の電着工法施工箇所も含めた瀬戸大橋全体における基本的な防食方針を固めた。上述の経緯を踏まえた防食工法の変遷を表-2に示し、現在の防食方針を以下に示す。

- 1) 海中部（海底～T.P.-1.0m）：電着工法を基本とする。ただし、基礎底面の水深が浅い箇所（T.P.-20m）では、電着工法の設備の搬入に用いる起重機船が係留できないなどの理由から、電気防食を実施する。
- 2) 干満帯下部（T.P.-1.0m～+0.5m）：スキンプレートのさびの上に、要求品質を満たさないものの強固な電着被膜が形成されていることから、既存の被膜を活用しながら電気防食を併用する。
- 3) 干満帯上部・飛沫部・気中部（T.P.+0.5m～）：湿潤型有機ライニングによる被覆防食を行う。スキンプレートの素地調整及び気中環境を確保するため、ドライボックス（写真-8）を用いて施工する。

なお、基礎底面がT.P.-50mと大水深部を有する南備讃瀬戸大橋BB6P、7Aについては、従来の電着工法では大水深部において、電着物の析出に要する時間、スキンプレートの素地調整、作業効率に課題があることから、従来より薄くした電着被膜と電気防食を合わせた併用工法を検討しており、現在試験施工箇所の追跡調査を実施している。これら2基及び船舶緩衝工が支障する南備讃瀬戸大橋BB5Pの3)を除く8基の防食工事は、2018年度に完了する予定である。

3.2 大鳴門橋多柱基礎防食

(1) 背景

1995年の兵庫県南部地震の被害を踏まえた平成8年の道路橋示方書の改定を踏まえ、大鳴門橋では2001年度に多柱基礎の耐震性能照査（レベル2地震動）を実施し、基礎杭の一部で耐力不足が想定された。そこで、建設時に構造部材とみなしていない多柱基礎鋼管について、基礎杭のコンクリートのはらみ出しを防止すると考えられることから、帯鉄筋による拘束効果を考慮し耐震性能を有しているという評価をしている。そのため、多柱基礎鋼管の健全性は多柱基礎全体の耐震性能と直結すること、

表-2 瀬戸大橋 鋼製ケーソン防食工法の変遷

Table 2 Transition of concept of corrosion protection (Seto-Ohashi Bridges)

防食工法 (※基礎底面の水深で区分) 施工開始年度	建設時 1980～	電着工法 1999～	飛沫・干満帯防食 (試験施工 HB3P) 2009～	電着・電防併用工法※ -20m以深 -20m以浅 2010～
気中部 (鋼製ケーソン上端) ～ T.P.+3.0m		無機ジンクリッチ プライマー	湿潤面用 エポキシ樹脂 +ふっ素樹脂	湿潤面用 エポキシ樹脂 +ふっ素樹脂
+2.5m				
+2.0m				
飛沫部 ～ +1.5m (HWL)		無機ジンクリッチ プライマー	湿潤面用 エポキシ樹脂	湿潤面用 エポキシ樹脂
+1.0m				
+0.5m				
0.0m				
干満帯部 ～ -0.5m ～ -1.0m ～ -1.5m (LWL)		(電着被膜析出)	電着被膜 +電気防食	電気防食
-2.0m				
～ (基礎底面)				
海中部		電着被膜	電着被膜	電着被膜

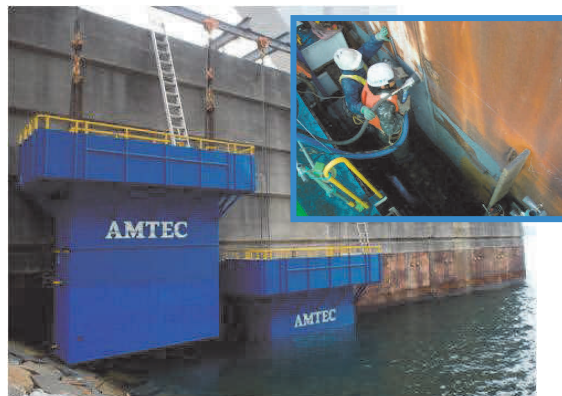


写真-8 ドライボックスによる施工
Photo 8 Situation of construction by using Dry-Box

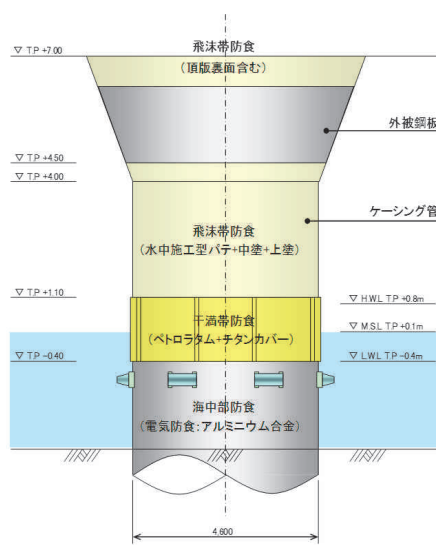


図-2 多柱基礎防食概要図

Fig.2 Corrosion protection for the multi-column foundation

また、基礎杭コンクリート本体の長期健全性を確保する観点からも、順次防食工事を実施している。

(2) 防食工事の概要

防食工事の概要図を図-2に示す。また、防食手法・対象範囲を以下に示す。

- 1) 海中部（海底～T.P.-0.4m）：流電陽極方式による電気防食

2)干満帯部 (TP.-0.4m~+1.1m) : 以下の3層で構成される。

防食層: ペトラタム系防食シート+同ペースト
緩衝層: 発泡ポリエチレンシート
保護層: チタンカバー

3)飛沫帯部 (TP.+1.1m~) : 水中施工型パテ+塗装

(3) 防食工事の沿革

1)海中部と2)、3)飛沫・干満帯部ともに、 $\phi 7\text{m}$ 杭に対して試験施工及び本施工を実施し、その後 $\phi 4\text{m}$ 杭の工事に移行している。

1)~3)のいずれも実績のある工法を採用しているが、1)の電気防食では試験施工を2001~2002年に実施している。陽極設置後約5ヶ月で、対象の杭基礎の電位が防食電位である -780mV 以下となり、2007年にはその周囲の杭基礎が防食電位以下であることを確認している。その後、他の基礎杭にも順次陽極を設置した。2)、3)の被覆防食についても試験施工を2003年度に実施し、その後順次展開している。一連の工事は、2017年度に完了する予定である。

4. 海中基礎の点検・調査

鋼製ケーソン及び多柱基礎鋼管の健全性の確認や余寿命把握のため、適宜点検・調査を実施している。点検・調査の内容や手法と、その結果の概要を次に示す。

4.1 電位測定による確認

電気防食を実施している海中基礎では、潜水による目視点検に代えて、鋼製ケーソンが防食電位以下であることを確認することにより、簡易的に海中基礎の健全性を確認している。

電位測定は、大鳴門橋を除き基礎天端から実施する。電圧計の一端を基礎天端に設置してある測定端子に接続し、もう一端 (照合電極) を海中に下ろすことで確認することができる (図-3)。大鳴門橋では、船舶により近接し、潜水作業により電位測定を行っている。

鋼製ケーソン設置時より電気防食を実施している多々羅大橋・来島海峡大橋では、防食電位 -780mV より卑 (マイナス) である $-1,000\text{mV}$ 以下であることを確認している。また、建設後に電気防食を実施した瀬戸大橋においても、時間経過とともに防食電位の範囲が拡大する様子を確認している。

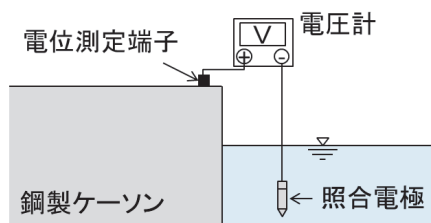


図-3 海中基礎天端からの電位計測方法
Fig.3 Method of electrometry

4.2 潜水による調査

(1) 壁面調査

一般に腐食環境が厳しい飛沫・干満帯部は船舶や仮設足場、干満帯以下の海中部についてはダイバーにより目視・触診・写真撮影や残存板厚の測定を行っている。調査は各基礎の代表箇所を設定し、海生生物等の付着物を除去してスキムプレートに対して実施しているが、孔食箇所については、代表箇所とは別に孔食の大きさ・深さを測定している。また、電着工法を実施している基礎については、電着被膜の形成状況の確認や、析出物の付着力をプルオフ法により確認している。

壁面調査により得た残存板厚及び孔食深さと、鋼製ケーソン設置からの経過年数を基に、水深別の腐食速度と残存寿命の算出をそれぞれ行っている。結果の整理については4.3にて後述する。

(2) 陽極消耗量調査

これまでに実施した電気防食は、全て流電陽極方式を採用している。使用する陽極の耐用年数は40~50年であるが、陽極の体積差や質量差を用いて消耗量を算出し、その経過年数から消耗速度及び余寿命の確認を行っている (写真-9)。塗膜等の被覆の有無や潮流の速さにより各橋で消耗量に差はみられるが、いずれも耐用年数と同等若しくはそれ以上の寿命となっている。



写真-9 陽極消耗量調査 (形状寸法計測)

Photo 9 Measurement of shape dimensions

4.3 点検・調査結果の整理

4.1、4.2の点検・調査の結果より次の傾向が見られる。

(1) スキムプレートの状態

建設時に防食が実施されている多々羅大橋・来島海峡大橋では、塗膜の膨れ・はがれ・割れやスキムプレートの腐食の発生もなく健全である。一方で、スキムプレートの防食が無機ジंकリッチプライマーのみである明石海峡大橋の海中部や瀬戸大橋については、腐食に伴い板厚の減少や孔食が発生している。水深方向での比較については、明石海峡大橋の例³⁾において、水深が浅いほど孔食の数は多く、より深く見られるが、水深が深いほどスキムプレートの残存板厚は薄く、全体的な腐食速度は速い傾向にある。一方、瀬戸大橋では、海中部の腐食速度に水深方向の大きな差は見られない。

(2) 腐食速度の経年変化

明石海峡大橋2Pと南備讃瀬戸大橋BB7Aにおけるスキンプレートの水深別の腐食速度の経年変化を図-3に示す。明石海峡大橋では、設置後約3年経過で0.25～0.30mm/年の腐食速度であったが、設置後約26年経過の2015年度の調査では0.15mm/年程度に減少しており、時間経過とともに腐食速度が低下している。また、南備讃瀬戸大橋の腐食速度はおおむね0.05～0.10mm/年であり、両海峡の潮流の速さの違いによる腐食速度の差はあるものの、海中部の標準的な腐食速度0.10～0.20mm/年⁹⁾付近に収束する傾向が確認できる。

(3) 陽極の消耗状態・余寿命

鋼材表面の被覆により、防食に必要な電流密度が減少し、陽極の消耗量も低下することが、来島海峡大橋の4Aと3P、5Pとの比較事例⁹⁾により確認されている。また、多々羅大橋2P、3Pと来島海峡大橋3P、4Aにおける外周平均潮流速と陽極の消耗速度の関係を図-4に示す。潮流が速い程、陽極の消耗速度も相対的に高いことが見受けられる。前述の被覆の有無による差が潮流速の差以上に支配的であることから、被覆の劣化により消耗速度の増加が懸念されるため、今後も定期的に被覆の健全性を確認していく必要がある。

4.4 今後の点検・調査計画

上述の点検・調査は、従前より点検要領を定め実施しているが、『道路法施行規則の一部を改正する省令』（平成26年7月施行）に対応するよう、点検要領を一部改定し、今後も同様に点検・調査を実施していくこととしている。全体計画では、5年ごとの潜水調査を基本としながら、電気防食を実施している海中基礎については、潜水の代替として防食電位の計測を5年ごと、潜水による調査を10年ごとに実施することを基本としている。

5. おわりに

建設時または供用後に防食工事を実施した鋼製ケーソンについては、全般として健全な状態にあると考えられる。しかし、海中基礎底面がT.P.-50mとなる南備讃瀬戸大橋BB6P、7Aや、T.P.-60mとなる明石海峡大橋2P、3Pといった大水深部を有する鋼製ケーソンの防食方法については、合理的な施工方法の検討⁶⁾はされているものの、大規模な工事が避けられない。一方で、腐食速度は大水深部ほど遅く、BB6Pでは今後30年経過してもスキンプレートの大部分が残存すると予測している。また、ケーソン内部のコンクリートの劣化性状を確認する暴露試験⁷⁾により、コンクリートが露出してもその劣化進行速度は遅いことが確認されている。

今後も引き続き、鋼製ケーソンの健全性を確認しつつ、

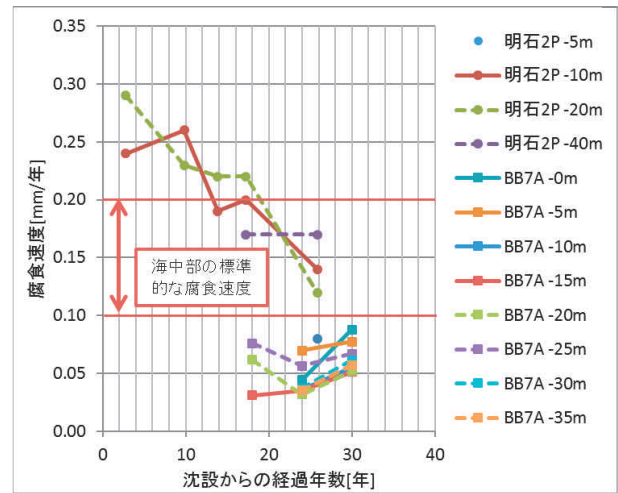


図-3 腐食速度の経年変化（明石海峡大橋・南備讃瀬戸大橋）

Fig.3 Changes in corrosion rate (Akashi-Kaikyo Bridge, Minami Bisan-Seto Bridge)

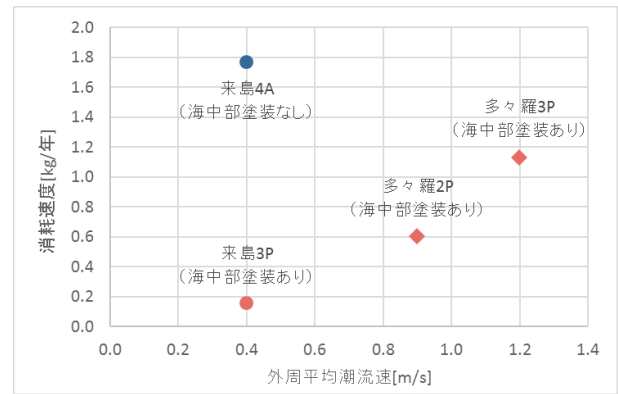


図-4 外周平均潮流速と陽極消耗速度の関係

Fig.4 Relation between tidal current velocity and anode consumption rate

海中基礎の適切で合理的な維持管理を進めていく方針である。

参考文献

- 1) 坂本佳也、大川宗男、宮口典博：鋼ケーソン電着防食の防食性能、本四技報、Vol.34、No.113、pp.7-11、2009.9
- 2) 寺下孝男、岡本浩幸：鋼製ケーソンの電着工法による防食の現況、本四技報、Vol.28、No.103、pp.39-44、2004.9
- 3) 麓興一郎、信重和紀、大爺健司：明石海峡大橋主塔基礎鋼ケーソンの腐食調査、本四技報、Vol.40、No.126、pp.24-31、2016.3
- 4) (財)沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル、pp.14-15、2009.11
- 5) 田向和則、川上明彦、横井芳輝：来島海峡大橋鋼製ケーソン電気防食の現況調査、本四技報、Vol.36、No.117、pp.12-17、2009.11
- 6) 竹口昌弘、北村岳伸：電着防食と電気防食を併用した大水深海中基礎の防食方法に関する検討、本四技報、Vol.40、No.126、pp.18-23、2016.3
- 7) 荻原勝也、西谷雅弘：技術開発計画（H26-H28）の成果、本四技報、Vol.42、No.129、pp.5、2017.9

道路維持管理設備の改善と今後の課題

Improvement of the Road Maintenance Facilities and Future Issues

朝倉 義博 Yoshihiro Asakura

保全部 設備課長

吉本 紀一 Norikazu Yoshimoto

保全部 電気通信課長

小野 祥史 Yoshifumi Ono

保全部 設備課長代理

明野 晃治 Koji Akeno

保全部 電気通信課長代理

概要

本州四国連絡高速道路では、お客様に安全・安心・快適な道路サービスを提供し、更に道路、橋梁等の維持管理作業を効率的に行うために多数の道路維持管理設備を整備している。本設備の保全にあたっては、時代の変化に対応し、新技術の導入等により、質の高い道路サービスの提供やライフサイクルコスト踏まえた安全で効率的な設備への改善及び更新、近接点検を実施するための橋梁点検補修作業車の改造や点検・補修技術の開発を実施している。

本稿では、道路維持管理設備において近年取り組んでいる設備の改善、新技術を導入した設備への更新、点検器具の開発の改善事例と今後の課題について報告する。

Honshu-Shikoku Bridge Expressway(HSBE) deploys a wide variety of facilities and equipment for operation and maintenance to efficiently manage roads and bridges, providing safe, secure and comfortable services for customers. In order to maintain these facilities and equipment, by using new technologies to cope with the changes of the times, HSBE is rendering high quality road services, upgrading and improving facilities in terms of safety and efficiency based on life cycle costs, remodeling maintenance vehicles for girder to safely and efficiently conduct proximity inspection, and developing inspection / repair technologies.

This paper reports that in recent years HSBE has been working on improvements of the existing facilities, update of the facilities introducing new technologies, development of the inspection equipment for the road maintenance facilities and equipment and future issues.

1. はじめに

本州四国連絡高速道路（以下「本四高速道路」という。）は、2018年に全通20年を迎える神戸淡路鳴門自動車道及び開通30年を迎える瀬戸中央自動車道（瀬戸大橋）、更に2019年に概成20年を迎える西瀬戸自動車道（しまなみ海道）の3ルートからなる本州と四国を連絡する全長172.9kmの高速道路であり、瀬戸内地域における交通の大動脈の役割を果たしている。本四高速道路には、お客様に安全、安心、快適な道路サービスを提供するために、道路、橋梁、トンネル、サービスエリア・パーキングエリア（以下「SA・PA」という。）等に多数の道路維持管理設備を整備しており、お客様に「信頼」される

保全の実施に取り組んでいる。また本四高速道路には海峡部をつなぐ長大橋が多数あり、200年以上の長期にわたり利用される橋をめぐし、常に良好な状態に維持し、損傷や故障が発生した場合には速やかに修理を行う万全な維持管理が求められている。

本設備の保全にあたっては、時代の変化に対応し、新技術の導入等により、質の高い道路サービスの提供やライフサイクルコストを踏まえた安全で効率的な設備への改善及び更新、近接点検を実施するための橋梁点検補修作業車（以下「作業車」という。）の改造や点検・補修技術の開発等を実施している。

本稿では、道路維持管理設備において近年取り組んでいる設備の改善、新技術を導入した設備への更新、点検器具の開発事例と今後の課題について報告する。

2. 交通管理設備の改善

交通管理業務では、お客様に安全・安心な道路サービスを提供するため、定期的な道路パトロールの実施、各種情報提供機器の監視・操作及び橋梁や舗装に重大な影響を与える車両制限令違反車両の取締り、並びに交通事故抑止のための対策・交通管理に係る啓蒙活動を行い、安全・安心・快適な道路環境の維持に努めている。本業務を実施するために整備している交通管理設備の改善事例について次に述べる。

2.1 交通管制システムの一元集約化と仮想化

本四高速道路では、これまで3ルート個別に路線単位で交通管理を行う3管制体制の交通管制システムを整備し、それぞれ独立したシステム運用を行ってきた。しかしながら、運用後約16年が経過し、システムの老朽化と維持管理費の削減という課題に直面した。また昨今のICT（情報通信技術）の発展に伴い本四高速道路の各路線間を結ぶ高速大容量の通信ネットワークを整備し、市場ではサーバ仮想化技術が普及してきた。このような背景を受け、各ルートの交通管制室を統合して3管制体制（神戸・岡山・尾道）から2管制体制（神戸・岡山）へ移行した。写真-1に更新後の神戸管理センター交通管制室の全景を示す。

新しい2管制体制での新交通管制システムでは、サーバ仮想化技術を導入し、相互の交通管制室が有事の際にシステムをバックアップできる遠隔地バックアップ機能（ディザスタリカバリ機能）を具備し運用を開始した。

新交通管制システムでは、図-1に示す構成のようにメイン側の装置をクラスタ構成（二重化）としている。システム障害発生時には瞬時に待機系へ処理を引き継ぎ、



写真-1 神戸管理センター新交通管制室

Photo 1 New traffic management room in Kobe operation center

継続運用を可能とした。

さらに、ハードウェアの複数台故障や大規模災害による拠点被災時の物理的な損傷に対しても、遠隔地にバックアップシステム（通常はメインを神戸、サブを岡山で運用）を整備しているため、遠隔地側のシステムに運用が迅速に切り替わり、機能停止を回避することができる。

システムの迅速な切り替えを実現するために、交通管制システムには新たに仮想化技術を用い、サーバ装置の物理的リソース（メモリ、CPU、HDD、ネットワーク等）を論理的に分割し、複数の仮想サーバで共有する仮想化システムを導入したり。

今回新たに導入した仮想化技術を用いた交通管制システムの集約化及び遠隔地バックアップシステムの構築は、高速道路会社でも初めての取組であり、他機関からは非常に注目されている。

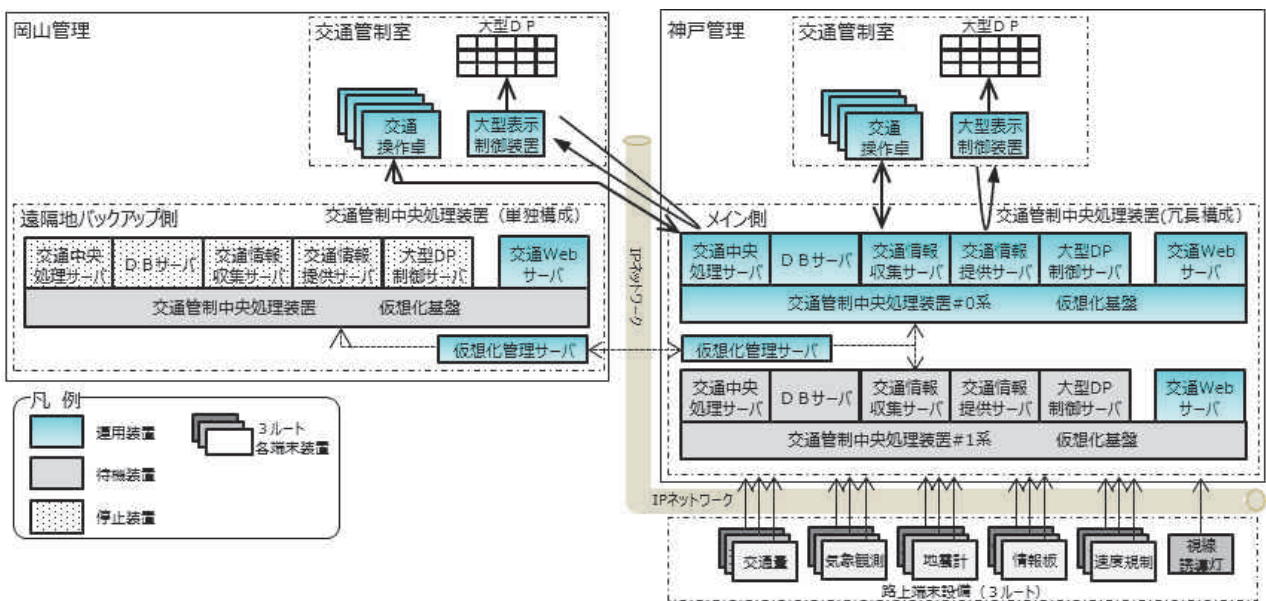


図-1 交通管制システム構成図

Fig.1 Configuration of traffic management system

2.2 高速通信ネットワークの整備

近年、ICT化が急速に進み、インターネットやモバイル通信等の普及に合わせて通信の大容量・高速化が進んでおり、本四高速道路の道路管理事業においても高速大容量通信ネットワークの構築が求められていた。従前の通信ネットワークの大半は、回線容量が小さく低速通信であった。このため、2010年から2015年3月にかけて段階的に本社と各管理センターを含む3ルート間を光ケーブルで結ぶ整備を行い、インターネットに利用されている大容量通信が可能なデータをパケットに分割して通信するIP (Internet Protocol) 方式による高速通信ネットワークを構築した (図-2)。

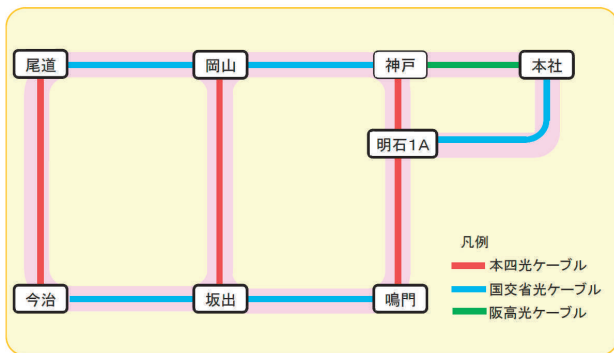


図-2 光高速通信ネットワーク構成図
Fig2 Configuration of optical fiber network

各管理センター～本社間を結ぶ高速通信ネットワークの整備にあたっては、「将来のデータ量増大を見込み高速・大容量通信が可能であること」、「安定かつ確実な通信が可能であること」、「光ケーブル切断等の通信異常の際、瞬時に通信ルートの切替が可能であること」、「経済的であること」等を考慮し、国土交通省や他高速道路及び通信事業者等で幅広く採用されているRPR (Resilient Packet Ring) 装置を採用した (図-3)。

また、高速通信ネットワークの整備では、拠点間の高速通信を行うRPR装置と各拠点にある道路管理事業用の各種システムをLAN接続するL3SW(Layer 3 Switch) を設置し、RPR装置間を光ケーブルで結んだ。この高速通信ネットワークにより各管理センター～本社間の通信容量が2.4Gbpsとなり、道路管理事業で使用する社内LANは100Mbps (従前は2～6Mbps) と大容量となった。またネットワーク構成は各ルート間を8の字構成として冗長性を確保した。これによりルート間のいずれかで事故や災害等により光ケーブルが切断した場合でも瞬時に迂回して通信の断絶を防ぐことができる通信網となった。

さらに、広域な大規模災害により光ケーブルが複数箇所断線した場合は、多重無線通信回線がバックアップ回線となり、非常時の重要通信 (音声・データ) が確保できる。

この3ルート間を結ぶ高速通信ネットワークが構築できたことにより、電話等の音声通信、道路情報板等の交

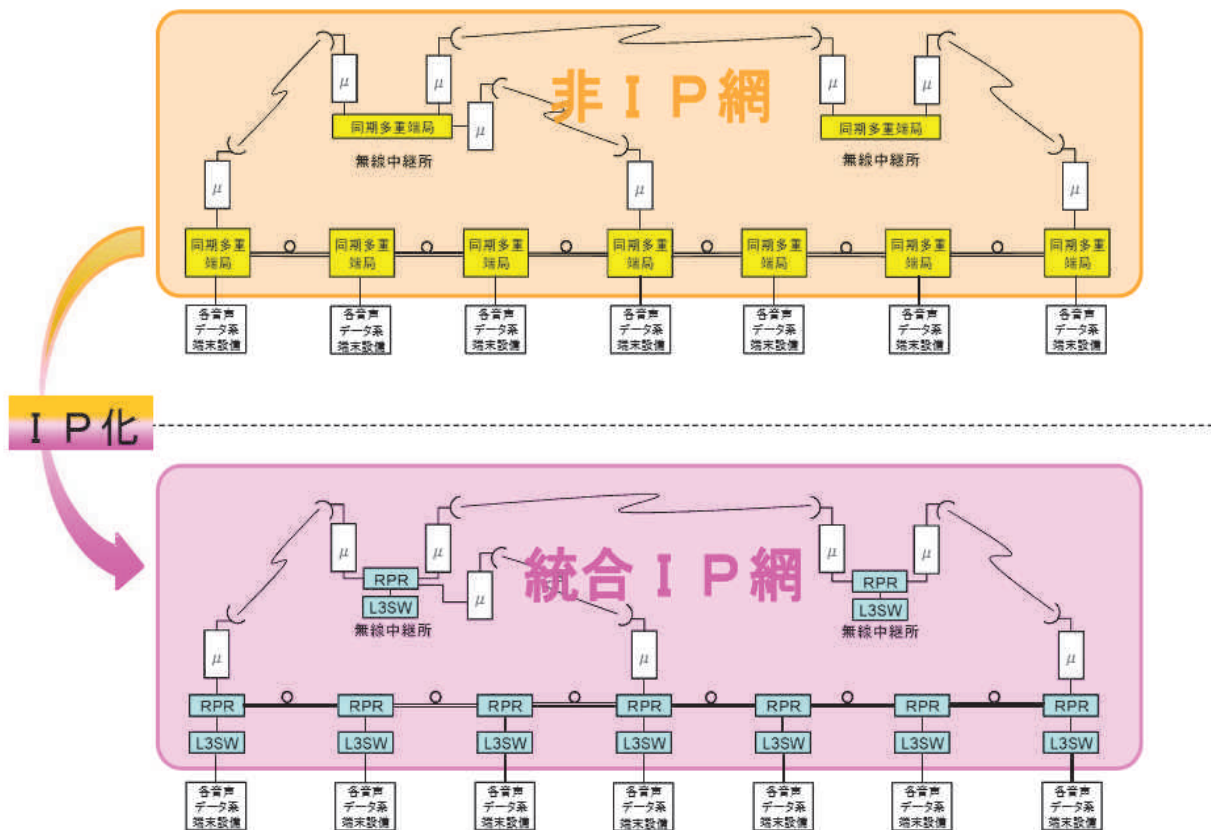


図-3 統合 IP 通信ネットワーク構成
Fig3 Integrated IP telecommunication network

通管理用設備を監視・制御するためのデータ通信に加えて、交通流等の道路状況を監視するCCTVの映像も、このネットワークで通信が可能となり、3ルート of 交通管制システムを集約し、2管制体制での統合交通管制室の構築が実現できた。

2.3 移動無線設備のデジタル化

本四高速道路の移動無線設備は、通常時の道路巡回隊のパトロールによる現場からの交通管制室等への連絡に加え、通行止め対応時における防災本部と現場間での状況報告、行動指示など各種情報連絡手段として活用している。既設の移動無線設備は、最も古いもので約25年が経過し、メーカー保守サポートの終了や修理部品の枯渇等により良好な設備状態を維持するのが困難な状況であった。また、総務省総合通信局からは、周波数有効利用の観点から、従来本四移動無線が使用してきたアナログ周波数帯を廃止しデジタル化へ移行することを求められていた。

更に既設の移動無線設備は、各ルート単位に統制局装置を配置した独立した3つのシステムであり、移動局から基地局を経由して交換機接続し交通管制室をはじめとする各拠点の内線電話と通話が可能であった（内線から移動局への呼出し通話も可能）。また、移動局との通話は、電話機の通話と同様に違和感のないスムーズな会話が可能となるよう複信方式を採用したが、呼損率（全体着信数における通話できなかった着信数の比率）が高くなるため、移動局及び基地局に本州四国連絡高速道路（株）（以下「本四高速」という。）に割り当てられた周波数の中で複数のチャンネルを設定し、空きチャンネルを自動的に使用するMCA方式（Multi Channel Access system）を採用していた。

2015年6月に更新した移動無線設備は、ルート間を接続するIPネットワークを利用することにより3ルート of 移動無線設備を1つの広域システムとして構築することが可能であり、統制局装置にあたる回線切換装置を1局配置とし低コスト化を図った（図-4）。通話方式の選定にあたっては、現在の運用形態から無線機としての利

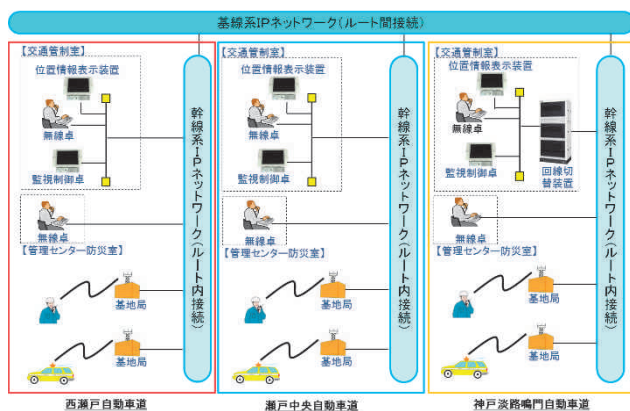


図-4 移動無線設備システム概要

Fig4 Configuration of digital mobile radiocommunication system

便性について現場へのヒアリングなどを行い検討した。その結果、平時に複信通話を必要とする場合は一般携帯電話を使用すれば足りること、防災時に複数端末が同報受信でき情報の早期伝達が可能となること、ダイヤリングが不要でプレストークによる1アクションでスピーディーに通信ができること、システムが簡素化できること、更新費の削減ができること等の利点より、通話方式は複信通話から単信通話に変更した²⁾。

新しく導入したパトロールカー搭載の車載型無線機にはGPS受信器を内蔵しており、GPSによる位置情報を基地局経由で交通管制室に設置された位置情報表示端末に送信し、図-5に示すように表示することが可能となっている。この位置情報は新交通管制システムにもデータ送信を行うことで、交通管制室の大型ディスプレイ上に車載端末の位置情報を表示し、情報共有を図ることが可能な仕様としている。

本機能は、事故発生時など、交通管制司令がパトロールカーの現在位置情報を瞬時に把握できることから、事故対応時の即応に有用である。

新型の車載型無線機、携帯型無線機を写真-2に示す。新型無線機は、ディスプレイを備え、ショートメッセージ機能を有している。既存の携帯型無線機は約1.2kgの質量があったが、新型では約255gとなり小型軽量化され、携帯性が大きく向上した。



写真-2 移動無線設備(携帯型・車載型)

Photo 2 New mobile radiocommunication

2.4 車両重量計設備の整備

安全・快適な道路の維持には、道路構造物の健全性の確保のための老朽化対策や交通危険の防止が求められており³⁾、道路の劣化への影響が大きい車両制限令等の法令違反大型車両等の通行抑止が課題となっている。一方、車両の重量や軸重を計測する車重計や軸重計からなる車両重量計設備は、本四高速道路の建設時に計画・設置されており、20~30年が経過して陳腐化により大型車両の重量計測が困難となっていた。更に経年劣化の進行及びメーカー保守サポートの終了並びに修理部品の枯渇等により良好な設備状態を維持するのが困難な状況であった。このため、2014年から2016年にかけて車重計を、2009年から2017年にかけて軸重計を整備した。

更新した車重計を写真-3に、軸重計を写真-4に示す。車重計は、これまで計測不可能であったセミトレーラの計測を可能とするために大型化している。また軸重計は、路面に埋め込まれたロードセルにより軸重を計測する従

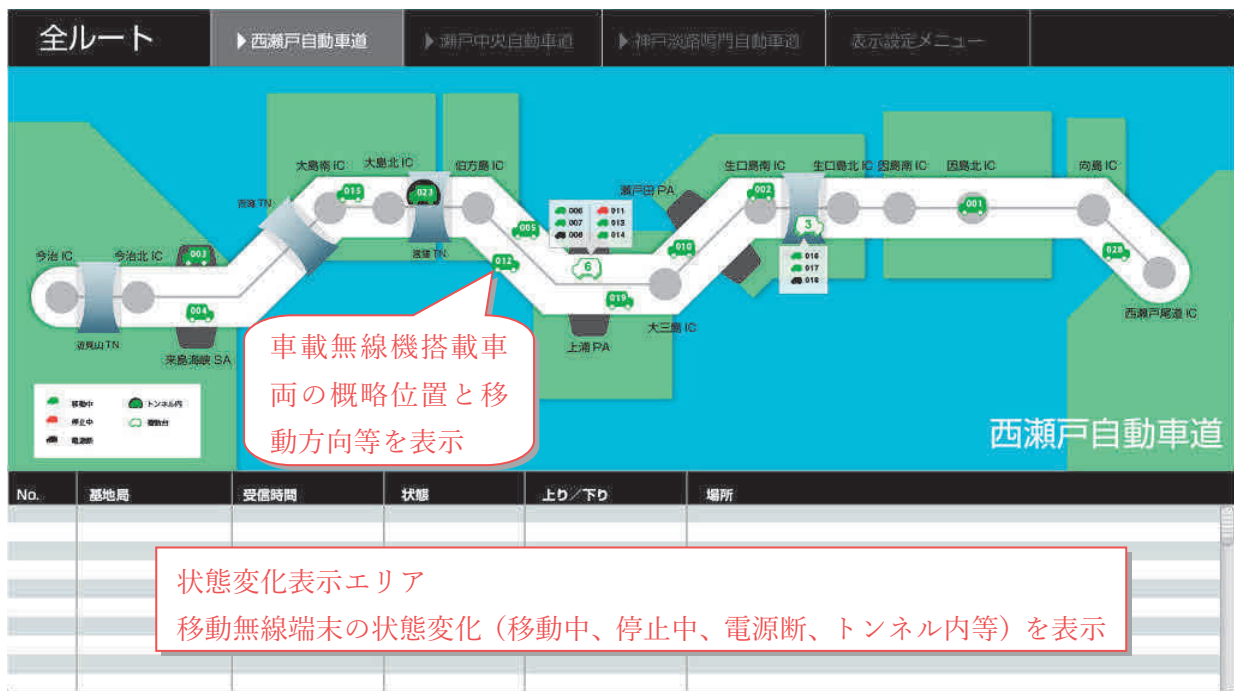


図-5 位置情報表示端末の表示例

Fig5 Location information using GPS

来の載荷板方式に新たに軸重センサーを増設し、料金所非停止車両でも自動で軸重計測ができる高速度対応型としている。これは、従来の通行料金の収受システムが磁気カード方式のため、入口料金所通過車両は磁気通行券の発行のために一旦停止し比較的に低速で通過していたのに対し、近年のETCの普及により入口料金所を高速で通過する非停止車両が多くなったためである。

また、従来は各料金所で計測・記録されたデータを社

員等が定期的に現地に出向き回収しとりまとめていたが、各料金所の記録装置をネットワーク化し全料金所データを1箇所ですべて収集できるように改善した。

3. SA・PAの給排水設備の改善

本四高速道路には、SA・PA内にトイレ、フードコート、レストラン等の休憩施設が配置されており、本施設で使用する飲料水（上水）やトイレ洗浄水（上水又は排水を浄化した再生水）は一旦水槽に貯水して給水ポンプで高置水槽に送水し、重力で加圧して配水している。また各施設から排出された排水は、汚水処理設備で浄化処理した後、トイレ洗浄水への再利用や、河川放流又は無放流設備による処理を行っている。また、公共下水道の整備地区では下水道に接続し排水している（図-6）。

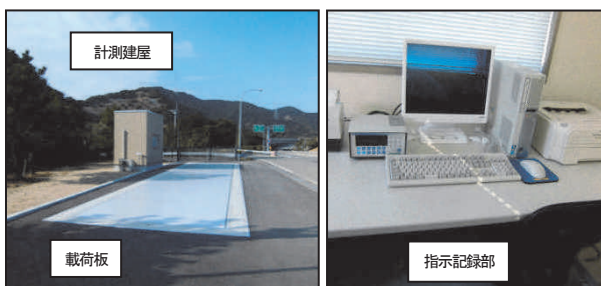


写真-3 車重計の更新

Photo 3 A truck scale renewal



写真-4 入口料金所の高速度対応型軸重計設備

Photo 4 High speed type axle scale at entrance toll gate

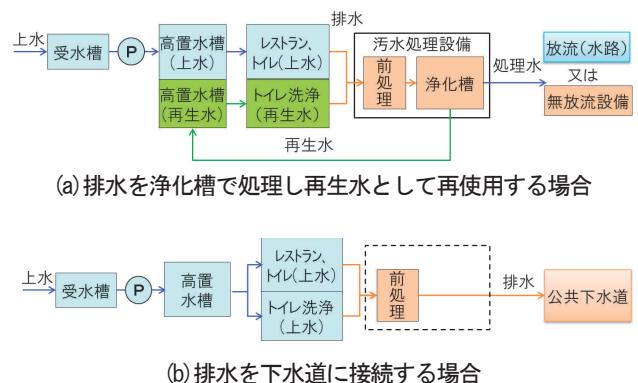


図-6 SA・PAの上水・再生水・排水の流れ

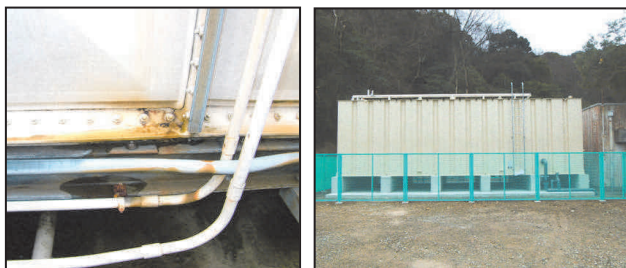
Fig.6 Flow of tap water, recycled water, sewage at a rest area

このため、SA・PA園地内には受水槽、汚水処理設備等の各種設備と各施設等を接続する数kmの上水を供給する給水管、再生水管、排水管を埋設している。これらの設備及び配管は高速道路建設時に設置され、20～30年が経過し、経年劣化の進行、機器の誤動作、漏水発生等の不具合が頻発したため、更新を行った。

3.1 給水設備の改善

従来の受水槽や高置水槽は、FRP製パネル構造が多く採用されていたが、経年劣化による鋼製構造部材の腐食やパネル継目目地等からの漏水等の不具合の発生が多くなった。このため、2013年から2017年にかけて大浜PA、淡路島南PA、室津PAの受水槽等を更新した。

水槽にはFRP製パネル構造、鋼板製一体構造等があるが、更新にあたっては、パネルの継目等がなく耐漏水性に優れ、かつ経済性と地震時等の信頼性に優れる鋼板製一体構造を採用している(写真-5)。



(a) 既設水槽の水漏れ状況 (b) 鋼板製一体型受水槽
写真-5 受水槽の劣化状況と鋼板製一体型受水槽

Photo 5 Degradation situation of receiving tank and renewal tank

3.2 給排水管の管種見直し

一般にSA・PAの給排水管は土中に埋設されており、漏水の発見には地上に吹き出した湧水による地面等のぬれの状態や水道使用量の増加等の現象を見極めて試掘調査を行う必要がある。一方、漏水を放置すれば水道料金の増加や路面の陥没等の重大な問題が発生するおそれがあり、配管の維持管理では早急な漏水発見と復旧が肝要となる。近年、鋼管腐食による漏水が度々発見され、その都度修繕を行ってきた(写真-6)。また、内部腐食した給水管では、赤水が発生し易く衛生上の課題となっていた。このため、2009年から2018年にかけて大浜PA、緑PA、淡路島南PA、鴻ノ池SA、与島PAの給排水配管の更新を実施した。

更新する配管の管種選定にあたっては、耐震性、将来の腐食や赤水発生防止、施工コスト等を踏まえ選定した。過去の大地震の被害事例⁴⁾によると、鋳鉄管、鋼管、硬質塩化ビニル管では破断して断水になるおそれがあり、耐震性継手を使用したダクタイル鋳鉄管では赤水発生の恐れがあった。このため、配管材質は耐腐食性と可とう性に優れる高密度ポリエチレン管とし、継手は耐震性に優れる融着継手を使用した(写真-7)。



写真-6 給水管の漏水状況と補修の事例(緑PA)

Photo 6 Leakage situation of water supply pipe and case of repair



(a) 埋設状況 (b) 共同溝内の添架状況

写真-7 給排水管(PE管)の布設状況(淡路島南PA)

Photo 7 Status of laying of PE pipes

4. 長大橋の維持管理設備の改善

本四高速道路には海峡を横断する鋼製の大型構造物で構築された長大橋梁が多数ある。これら長大橋は、飛来塩分等による鋼材の腐食防止対策として塗装を行っており、かつ海上の高所にあるため点検・補修等の接近手段が限られる等の特徴がある。このため、長大橋には点検、補修、塗替塗装等の保全作業を安全かつ効率的に行うために、補剛桁、主塔、主ケーブルの各構造部材に接近する移動足場として、各橋梁専用の作業車が設置されている。

一方、供用後の長大橋の保全では、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が求められており、アセットマネジメントの考え方を導入したライフサイクルコストが最小となる予防保全の実施、保全作業の更なる安全と効率性の向上、道路法施行規則(省令)の改正・公布に伴う5年ごとの近接点検の実施等が求められている。これら橋梁保全のニーズに対応するため、設備の保全にあたっては、近接点検を実施する安全で効率的な桁作業車の改造や点検器具等の開発を実施している。

以下に設備の改善・開発の事例として、大鳴門橋の補剛桁に設置されている桁作業車のアプローチ率向上の取組及び主塔点検ロボットの開発について述べる。

4.1 桁作業車のアプローチ率向上への取組

本四高速道路の長大橋の補剛桁には、桁外面部材に接近するための桁外面作業車、トラス桁内面の部材に接近

するための桁内面作業車が配置されている。大鳴門橋に設置されている桁外面作業車と桁内面作業車の外観を写真-8に示す。桁作業車による補剛桁の各部材面積に対するアプローチ率（桁の各部材面積に対して桁作業車で近接可能な面積の割合）は、桁構造が単純な箱桁では約70~100%と高いが、桁構造が複雑なトラス桁では約40~82%と低い値である。

大鳴門橋の既設桁作業車による桁部材への接近範囲を図-7に示す。大鳴門橋の桁作業車は、本四高速道路の長大橋建設の初期に製作されており、桁作業車による各部材面積に対するアプローチ率は、約40%と他橋に比べ著しく低い。これは、大鳴門橋桁外面作業車には瀬戸大橋や明石海峡大橋に具備されている桁内面に差し込める側面フレームの伸縮昇降足場が無く、またトラス桁の各部材の接合部等には、伸縮昇降足場でも接近できない近接困難箇所があるためである。一方、大鳴門橋は長大橋の中で唯一太平洋に面した場所に位置し、最も腐食環



写真-8 大鳴門橋の桁外面作業車と桁内面作業車
Photo 8 Girder maintenance vehicles of Ohnaruto Bridge

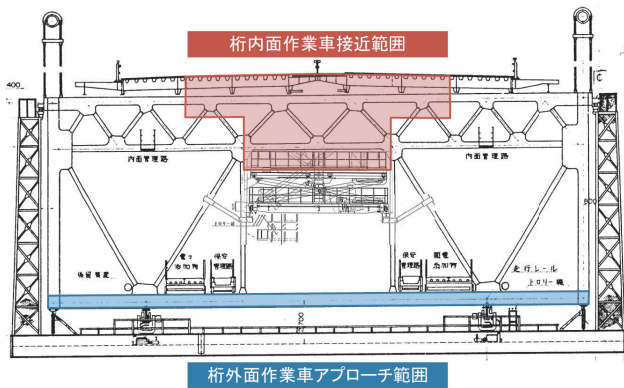


図-7 既設の桁作業車による大鳴門橋の接近範囲
Fig.7 Approach area by maintenance vehicle of Ohnaruto Bridge



写真-9 近接困難箇所と鋼床版縦桁支承部局部腐食状況
Photo 9 Hard-to-reach area and localized corrosions

境が厳しい橋梁であり、鋼床版縦桁支承部等に局部的な腐食が発生し易く迅速な補修が必要となっている（写真-9）。更に道路法施行規則（省令）の改正・公布に伴い従来では近接困難な箇所への点検が必要となっている。

このため、大鳴門橋では局部補修箇所及び近接困難箇所へ接近できるように桁作業車の改造検討を実施した。桁作業車改造後のイメージを図-8に示す。

桁作業車の改造は、(1)桁内面作業車横行台車の補助作業台の拡幅、(2)横行台車軽量化と昇降装置補強による横行台車の移動範囲の拡大、(3)横行台車脇の制御ケーブル等の突起物移設による小組トラス接近範囲の拡

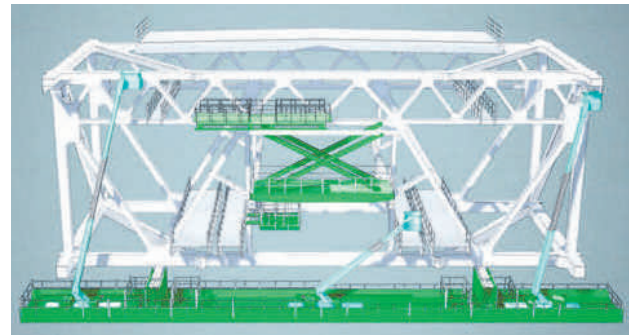


図-8 大鳴門橋の桁作業車改造後のイメージ
Fig.8 Modification plan for the Ohnaruto Bridge

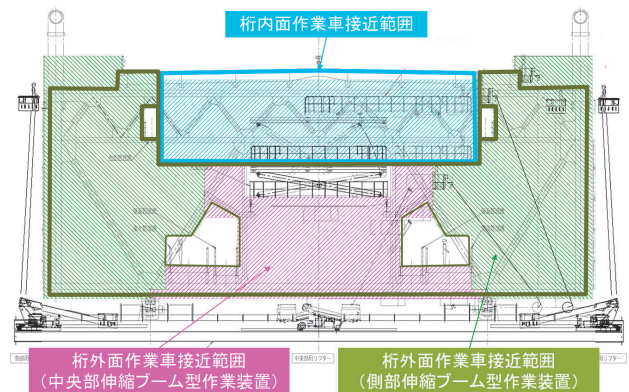
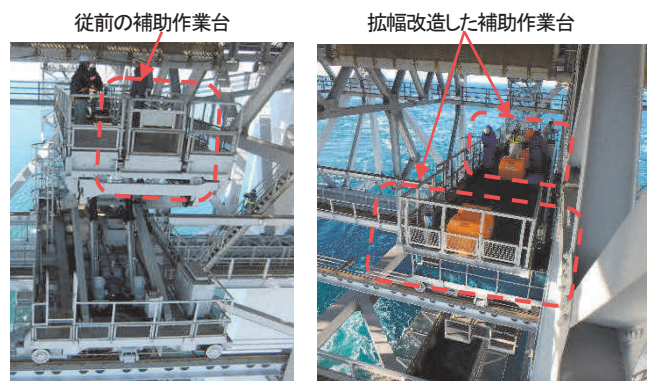


図-9 改造後の桁作業車による大鳴門橋の接近範囲
Fig.9 Approach area by remodeling vehicle of Ohnaruto Bridge



(a) 改造前 (b) 改造後
写真-10 大鳴門橋桁内面作業車の改造前後の状況
Photo 10 The situation before and after the remodeling of vehicle

大、(4)桁外面作業車の側面フレームの撤去と中央部及び側部への伸縮ブーム型作業装置の設置である。これらの改造を行うことで、桁作業車のトラス桁の各部材面積に対するアプローチ率は約 90%に向上する予定である(図-9)。桁作業車の改造は、桁内面作業車 1 台が 2018 年 2 月に完了(写真-10)しており、桁外面作業車 1 台は 2019 年 2 月に完了する予定である。

今後は、改造した桁作業車を用いた橋梁保全作業を実施して改善点等を抽出し、残りの桁作業車の改造に反映する予定である。

4.2 主塔点検ロボットの開発

本四高速道路の長大橋で主塔がある橋梁は 15 橋あり、主塔高さは新尾道大橋の 78m から明石海峡大橋の 296m までと非常に高い主塔も含まれ、全て鋼製で防せい対策として塗装を行っている。本主塔の塗膜点検を行う接近手段としては、ゴンドラや足場等があるが、これらは風による揺れや高所作業での墜落防止の安全対策等が必要となる。

このため、遠隔操作により塔体の任意の位置に接近して壁面の表面状況を確認できるロボットが必要となった。本ロボットの実現には、本四高速道路で最も主塔が高くロボットの登はん条件が厳しい明石海峡大橋で使用できることが必要であり、これを踏まえロボットの要求性能は、(1)段差40mmの添接ボルト等の乗り越えが可能、(2)300mの鉛直壁面の登はんが可能、(3)地上から遠隔操作が可能、(4)任意の位置での塗膜点検が可能、(5)塔内通路から資機材等の搬入出と運搬が容易であること、

表-1 開発中の主塔点検ロボットの主要仕様

Table 1 Specification of robot

項目	仕様	
車体	寸法	幅約 0.6m×長さ約 1m×高さ約 0.5m
	走行機構	磁石車輪駆動
	昇降速度、昇降高さ	最大 10m/min、約 300m
附属装置	カメラ装置	操作・点検用カメラ
	安全対策	保安ロープ
ロボット質量	約 80kg	

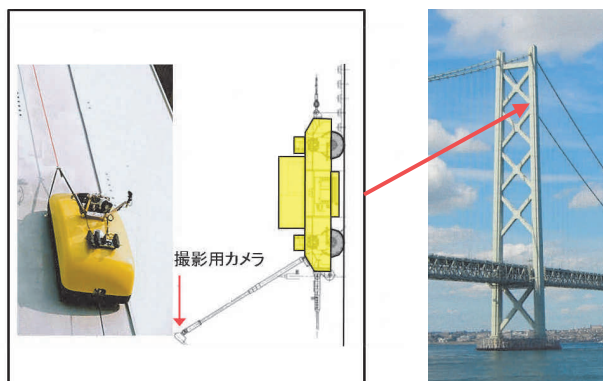


図-10 主塔点検ロボットのイメージ図

Photo 10 Image diagram of main tower inspection robot

(6)小型で軽量であること等の条件を満たす必要がある。現在開発中の主塔点検ロボットの仕様を表-1 に、イメージを図-10 に示す。ロボットは、磁石車輪で壁面に吸着し任意の位置に移動できる走行装置、ロボットの操作と点検を行うカメラ、これら进行操作する操作卓で構成する。ロボットの操作は、全て陸上の操作卓で遠隔操作する。また、ロボットは車輪の操舵により主塔の任意の位置に移動できる予定である。

本ロボットは現在製作中であり、今後長大橋の実橋において性能確認試験を行う予定である。

5. 道路維持管理設備の今後の課題

今回紹介した設備改善、新技術を導入した設備への更新、点検器具の開発の他にも、本四高速ではその時代の要求に応じた大小様々な改善、開発を実施している。しかし、お客様への安全、安心、快適な道路サービスの十分な提供や、道路・橋梁の保全作業に必要な設備の開発は十分とはいえない。今後も本四高速道路の保全においては、時代の変化に対応し、お客様のニーズや道路及び橋梁保全のニーズを調査し、道路維持管理設備の改善や新規設備の開発を更に推し進める必要がある。

6. おわりに

本四高速では、お客様に安全、安心、快適な道路サービスを提供し、かつ200年以上の長期にわたり、お客様に安心して利用される橋を目指し、予防保全を基本とした万全な維持管理に取り組んでいる。

道路維持管理設備は本取り組みを行う上で重要な役割を果たしている。今後も設備の保全にあたっては、より質の高い道路サービスの提供、ライフサイクルコストを踏まえた設備更新、より安全で効率的な設備への改善、新技術を導入した設備更新、点検器具の開発等を推進していく所存である。

参考文献

- 1) 三橋直樹：交通管制システムの一元化集約と仮想化導入、本四技報、Vol41、No.127、pp.2-7、2016.9
- 2) 三橋直樹、玉津和哉：本州四国連絡道路の次世代移動無線について、(一財)建設電気技術協会、2014技術集、pp.84-88、2014.9
- 3) 「道路の老朽化対策に向けた大型車両の通行の適正化方針」、報道発表資料、国土交通省道路局、2014.5.9
- 4) 管路の耐震化に関する検討報告書、平成25年度管路の耐震化に関する検討会、厚生労働省、pp.46-62、2014.6

瀬戸大橋斜張橋（櫃石島橋、岩黒島橋）の 耐震補強設計

Seismic retrofit design of Seto-Ohashi cable stayed bridges (Hitsuishijima and Iwakurojima Bridges)

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani 田村 正 Tadashi Tamura 平山 靖之 Yasuyuki Hirayama

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

長大橋技術センター
総括・耐震グループ

概要

平成25年度から開始した瀬戸大橋の道路鉄道併用区間（約12km）の耐震補強は平成32年度完成を目標に実施している。ここでは、瀬戸大橋のうち、櫃石島橋、岩黒島橋の2橋の耐震性能照査及び補強設計について報告を行うものである。

耐震性能照査の結果、櫃石島橋では横トラス下弦材で、岩黒島橋では横トラス下弦材と橋脚に損傷が生じることが分かった。横トラス下弦材の補強工法にはリブ補強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, has been conducted since 2013 and will be completed by the spring of 2021. This paper presents the results of seismic performance verification and the seismic retrofit design of the Hitsuishijima and Iwakurojima Bridges.

As the result of the seismic performance verification, it was found that lower chords of transverse trusses in the bridges and an end pier of the Iwakurojima Bridge would be damaged. It was decided that the seismic measure using rib reinforcement was selected.

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し、平成32年度の完成を目指して現在実施中である。瀬戸大橋を構成する橋梁のうち、櫃石島橋、岩黒島橋の2橋については、平成27年度から耐震性能照査を開始した。

耐震性能照査の結果、損傷部位は2橋に共通しては横トラス下弦材数ヶ所で、岩黒島橋については橋脚でせん断破壊が生じることが分かった。本橋梁の耐震補強工事は平成31年度に実施する予定である。本文では櫃石島橋、岩黒島橋の耐震性能照査及び補強設計について報告する。

瀬戸大橋は道路鉄道併用橋であり、耐震補強設計を実施した2橋は、国内でも有数の橋長を誇る。瀬戸大橋の耐震性能照査については、道路橋示方書¹⁾（以下「道示」という。）の適用外の長大橋であり、また道路鉄道併用橋の特殊性を鑑み、耐震性能照査、補強検討及び設計については当社が設置した本四耐震補強検討委員会に意見を伺った。

2. 橋梁概要

櫃石島橋、岩黒島橋はいずれも児島ICと与島PAの間に位置し、ともに橋長790m、最大支間長420mの双子の3径間連続鋼トラス斜張橋である。本橋梁の一般図を図-1に、橋梁概要を表-1に示す。2橋合わせて8基の基礎があり、陸上部の3基は地表から比較的浅い位置に花崗岩が分布しているため直接基礎形式が、海中部の5基は設置ケーソン工法によるケーソン基礎形式が採用されている。本橋梁の主桁は、瀬戸大橋の吊橋、下津井瀬戸大橋、南北備讃瀬戸大橋の3橋とは異なり、横トラス上弦材と鋼床版が高力ボルトによって接合された構造である。このような合成構造の採用により、主構上弦材だけでなく鋼床版もケーブル張力の水平分力を分担できる。また、道路鉄道併用橋の場合、主桁の剛性を高め、変形及び応力の変動幅を小さく抑え疲労耐久性を向上させる必要があるが、合成構造の採用が桁の剛性の向上に大いに寄与している。本橋梁の橋軸方向耐震固定法として、地震力の分散と軽減、橋軸方向移動量の抑制の観点から、皿ば

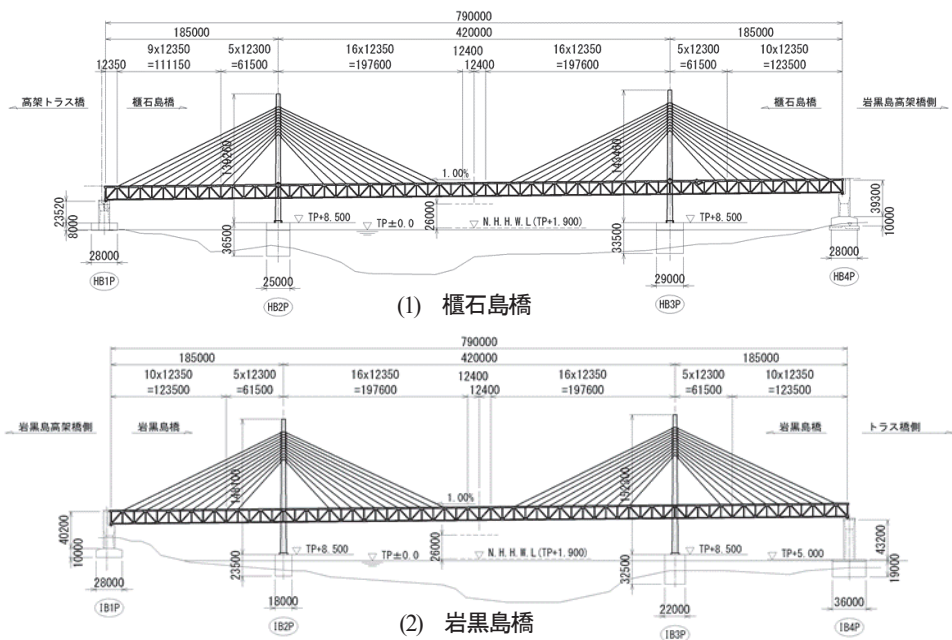


図-1 橋梁一般図

Fig.1 General view

表-1 橋梁概要

Table 1 Outline of bridges

橋梁名	櫃石島橋	岩黒島橋
形式	3径間連続鋼トラス斜張橋 (2面ファン形式マルチケーブル)	
基礎形式	HB1P：直接基礎	IB1P：直接基礎
	HB2P：ケーソン基礎	IB2P：ケーソン基礎
	HB3P：ケーソン基礎（脚付き）	IB3P：ケーソン基礎
	HB4P：直接基礎	IB4P：ケーソン基礎
橋長	790 m	790 m
支間割	185 + 420 + 185 m	185 + 420 + 185 m
縦断勾配	1% 直接勾配	1% 直接勾配
適用耐震基準	耐震設計基準・同解説（本四公団、昭和52年）等	

ねからなるスプリング沓と三角リンクを組み合わせた両端2点分散弾性固定法が採用されている。

本橋梁に適用されている耐震基準は、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ため、ある程度の補強が必要であることが予想された。本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。

3. 耐震性能照査

3.1 入力地震動

本橋梁における設計地震動の概略⁴⁾は以下のとおりである。地震動は、瀬戸大橋地点の地盤構造、近隣の断層等を考慮し、断層モデルにより設定した大規模地震とし、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。解析に用いた入力地震動は、工学的基盤による地震動を基にし、HB1P、HB4P、IB1Pは直接基礎であるため、一次元波動伝播解析（SHAKE）にて基礎底面位置での入力地震動を設定した。その他の基礎はケーソン基礎であり、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解析にて基礎底面位置での入力地震動を設定した。なお、岩盤上の基礎に対する鉛直地震動については、基盤波と基礎底面位置での有効入力地震動の差異が小さいことから、基盤波を基礎底面に与えることとした。耐震性能照査及び補強設計に用いた入力地震動のうち、代表としてHB2P基礎底面位置の地震動の加速度応答スペクトル及び櫃石島橋の主要な振動モードの固有周期を図-2に示す。

地震動の入力は、本橋梁が道示¹⁾の適用範囲である支間長200mを超える長大橋であることから地震動の3次元

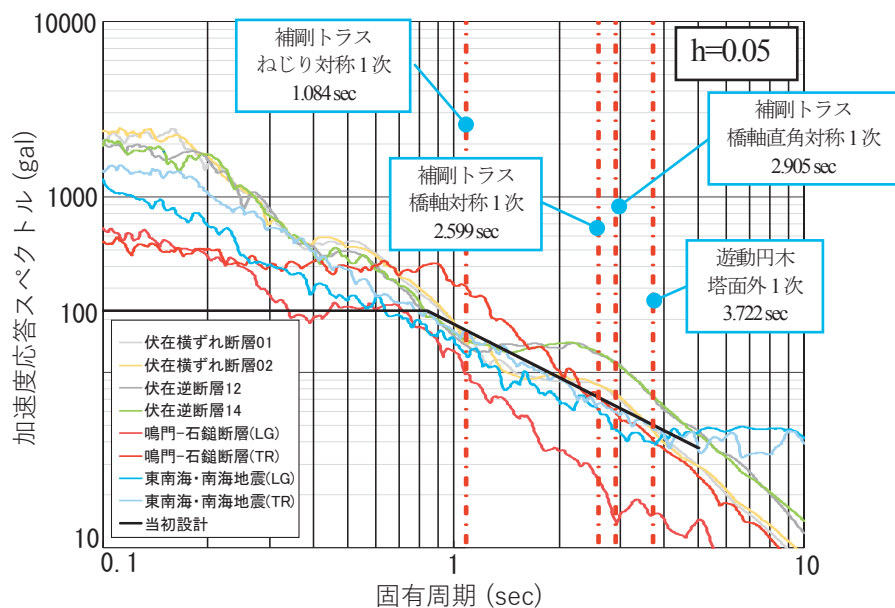


図-2 HB2P 基礎底面における入力地震動の加速度応答スペクトル
 Fig.2 Acceleration response spectrum of input seismic motions at the bottom of HB2P

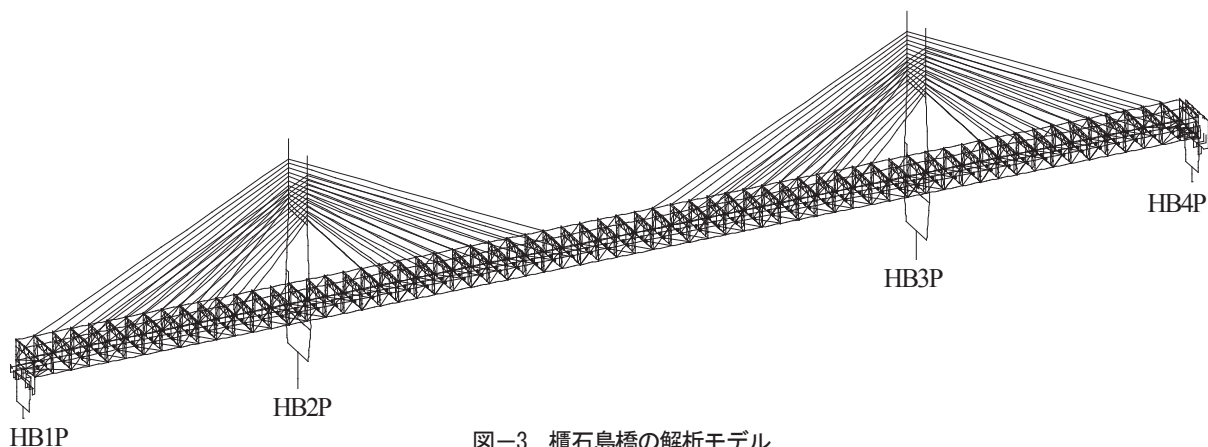


図-3 櫃石島橋の解析モデル
 Fig.3 Analytical model of Hitsuishijima Bridge

的な挙動を考慮するため、水平2方向、鉛直の3方向同時入力とした。伏在断層を想定した地震波は、橋軸方向と橋軸直角方向に鉛直方向を組み合わせた2方向にそれぞれ入力し、逆断層、横ずれ断層それぞれ2波の平均値で照査を行った。

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には、列車荷重を考慮しており、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。

3.3 解析モデル

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をモデル化した。図-3に櫃石島橋の解析モデルを示す。

(1) 補剛トラス桁、塔、橋脚

補剛トラス桁、塔、橋脚では地震による軸力変動と2軸曲げを適切に評価するために、ファイバー要素によりモデル化した。材料構成則は応カーひずみ曲線を基本とし、局部座屈の影響を考慮した非対称バイリニアモデルとした。

さらに、格点間の曲げ変形と軸力によって生じる付加曲げを評価するために、主構トラスの格点間を6要素程度以上に分割してモデル化した。横トラス上弦材と鋼床版との連結部は、応答値が過小評価とにならないように、線形でモデル化することを基本とした。

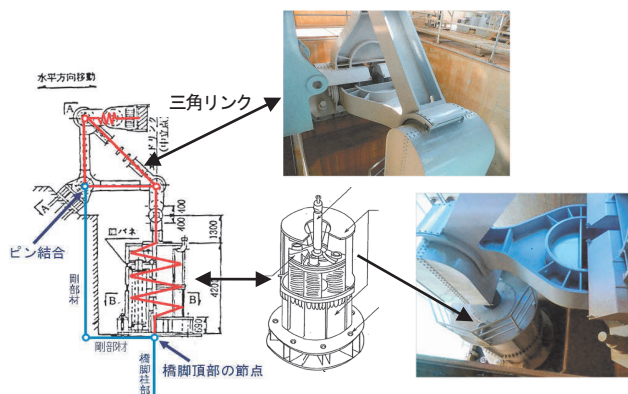


図-4 三角リンク及びスプリング沓の解析モデル
Fig.4 Analytical model of triangular link and spring bearing

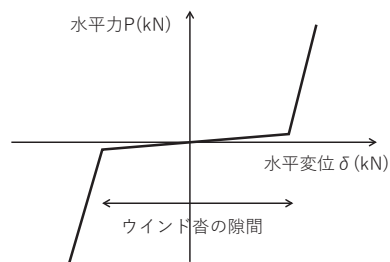


図-5 ウインド沓の非線形性 (スリップモデル)
Fig.5 Non-linearity of wind bearing (slip model)

表-2 各部材のモデル要素及び減衰定数

Table 2 Model elements and damping constant of members

部位	部材	モデル要素	材料特性	減衰定数
上部構造	主構トラス、横トラス、 下横構	ファイバー要素	非線形 (鋼)	0.01
	道路桁、鉄道桁	線形梁要素	線形 (鋼)	0.02
塔		ファイバー要素	非線形 (鋼)	0.01
ケーブル		ケーブル要素	線形 (鋼)	0.01
下部構造	端橋脚	ファイバー要素	非線形 (コンクリート)	0.02
	道路桁支承、鉄道桁支承	バネ要素	-	0.00
支承部	タワーリンク、エンドリンク	トラス要素	-	0.00
	ストッパー沓、ウインド沓	バネ要素	-	0.00
	スプリング沓	バネ要素	-	0.02
	三角リンク	線形梁要素	-	0.00
基礎-地盤系		バネ要素	-	0.10

(2) ケーブル

ケーブルは、非抗圧性（幾何学的非線形性）を考慮するために10要素に分割して、たわみを再現できるモデルとした。

(3) タワーリンク、エンドリンク

タワーリンク、エンドリンクはトラス部材としてモデル化し、幾何学的非線形性による水平方向の変形に伴い発生する抵抗力を考慮した。

(4) 三角リンク、スプリング沓、ウインド沓

三角リンクの水平方向の変位によって、スプリング沓は鉛直方向に変位が生じるように挙動するが、モデル化においても図-4に示すように形状を詳細にモデル化した。

ウインド沓は隙間に伴う荷重-変位関係の非線形性を考慮するために、図-5に示すスリップモデル（非線形弾性）によりモデル化した。

(5) 基礎-地盤系

基礎の回転ばねの非線形性は、鉄道構造物等設計標準⁹⁾に準じてモデル化した。海中の基礎は、基礎周囲の動水圧の影響を付加重量として考慮した。

(6) 減衰モデル

減衰定数は、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。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を参考に、表-2

のとおり設定した。

3.4 解析方法

本橋梁は可とう性に富む構造物であるため、地震応答解析は幾何学的非線形性と材料非線形性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）を行った。

3.5 耐震性能照査

鋼部材の照査は、ファイバー要素のひずみによる照査と道路橋示方書Ⅱ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を併用して行った。また、タワーリンクなどは、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や移動可能量等で照査した。本橋梁の鋼床版は高力ボルトによって横トラス上弦材と接合された構造であるため、道路桁支承として、高力ボルトの耐力を照査した。

表-3に2橋の耐震性能照査結果として、各部材の許容値に対する最大応答値の比率を示す。2橋とも大規模地震に対して損傷箇所は少なく、塔、主構など主要な部材に損傷は確認されず、許容値を超過する応答値が作用する部材としては塔付近の横トラス下弦材と橋脚基部のみであった。

予想よりも損傷箇所が少なかった要因としては当初設計時と耐震性能照査時の入力地震動が挙げられる。図-1

表-3 櫃石島橋・岩黒島橋の耐震性能照査結果総括

Table 3 Summary of seismic performance verification

部位	部材	照査項目	櫃石島橋	岩黒島橋	最大応答値決定波形・損傷箇所
上部構造	主横トラス	軸力+曲げ	0.950	0.894	
	横トラス	軸力+曲げ	1.193	1.091	2橋ともに東南海・南海地震波、下弦材
	下横構	軸力+曲げ	0.732	0.690	
	道路桁支承（高力ボルト）	反力	0.793	0.852	
塔		引張応力度	0.916	0.901	
ケーブル		軸力	0.473	0.440	
下部構造	橋脚	曲げモーメント	0.754	0.781	
		せん断力	0.926	1.218	東南海・南海地震波、基部
支承部	タワーリンク エンドリンク	軸力	0.576	0.568	
	スプリング沓	反力	0.544	0.601	
		移動量	0.655	0.640	
	ストッパー沓	移動量	0.782	0.764	
ウインド沓	反力	0.860	0.990		
基礎-地盤系	フーチング	曲げ、せん断力	OK	OK	

表-4 上部構造重量比較表

Table 4 Comparison of weight of a superstructure

項目	当初設計	耐震性能照査
鉄道載荷状態	完成4線時	暫定2線時
上部構造重量	39,500 kN	36,000 kN
重量比率（当初比率）	1.000	0.911

2より斜張橋の主要な振動モードの固有周期は、おおむね1秒以上（主構トラスの橋軸・橋軸直角方向の対称1次振動モードではおおむね2.5秒以上）の長周期域であった。耐震性能照査に用いた加速度応答スペクトルと当初設計の加速度応答スペクトルは、この範囲においては同等レベルの加速度応答スペクトルであることがわかる。また鉄道桁重量についても、当初設計では完成4線の重量を見込んだのに対して、耐震性能照査では暫定2線時の重量を見込んでいる（表-4）。同等レベルの加速度応答スペクトルにおいて、上部工重量が軽いと応答値は小さくなる傾向にあり、許容値を超える部材が少なくなつたと考えられる。ちなみに、当初設計及び耐震性能照査における地震時断面力を比較したところ、主構トラスに作用する設計軸力は当初設計時と同等であった。

ケーソン基礎について、安定照査では損傷は確認されなかったが、部材照査では一部損傷が生じた。そこで、FEM解析により、ケーソン基礎の安全性を確認したところ、十分な安全性を有していることが確認できたため、ケーソン基礎の補強は不要と判断した。

櫃石島橋では横トラス下弦材4箇所、岩黒島橋では横トラス下弦材5箇所とIB4Pの基部に損傷が確認された。櫃石島橋及び岩黒島橋は支間長等の基本スケールが同じ双子橋であるが、塔高については岩黒島橋の方が10m程高いため、全体的に岩黒島橋の方が固有周期が長い。さらに、入力地震動についても、両橋に対して同一の地震

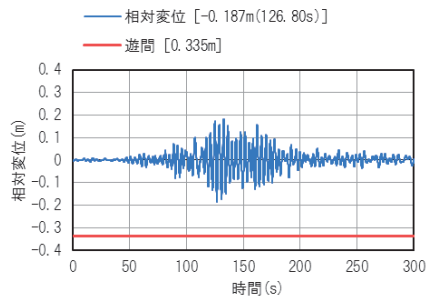
動を入力しているのではなく、HB2P、IB2P、IB3Pの各基礎において設定した地震動を個々の基礎に入力しているため、各橋梁における応答値が異なる。以上の違いから、両橋梁における損傷箇所には差異がでたものと考えられる。

3.6 スプリング沓による減衰効果

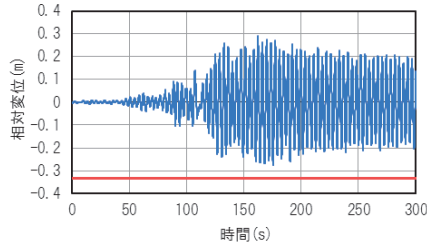
前述のとおり、本橋梁は、地震力の分散と軽減、橋軸方向移動量の抑制を目的に、スプリング沓が設置されている。そこで、スプリング沓の減衰が解析結果に及ぼす影響について確認した。

スプリング沓の減衰定数については当初設計時に実験により確認された $h=2\%$ をモデルに適用した。橋軸方向における地震時応答は桁端部に設置しているスプリング沓のパネ剛性だけでなく、本部材の減衰定数の影響も大きく受けると考えられる。そこで、スプリング沓に期待する減衰が得られない場合として $h=0\%$ の時刻歴応答解析の結果と比較した。入力地震動は、補剛トラス桁の照査において最も支配的な地震波である東南海・南海地震と、大きな変位が生じる伏在逆断層の2波とした。

まず、スプリング沓の減衰が補剛トラス桁の橋軸方向変位に与える影響として、補剛トラス桁とストッパー沓との相対変位に着目し、比較した。図-6 に東南海・南海地震時における櫃石島橋の相対変位の時刻歴を示す。スプリング沓の減衰定数 $h=0\%$ の場合、補剛トラス桁と



(1) 減衰を期待する場合



(2) 減衰を期待しない場合

図-6 補剛トラス桁とストッパー杓との相対変位 (HB1P)

Fig.6 Relative displacement between truss girder and stopper bearing (HB1P)

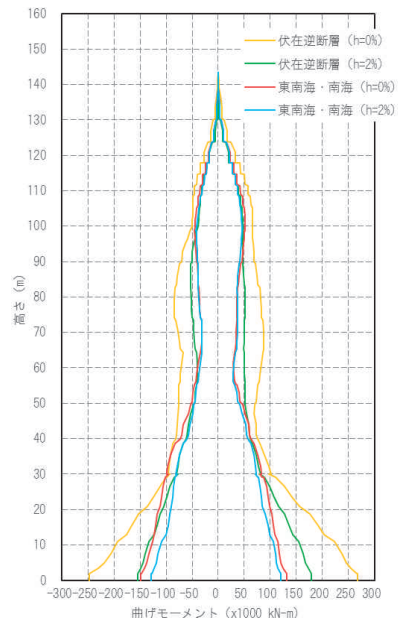


図-7 塔柱最大・最小面外曲げモーメント図 (HB3P)

Fig.7 Minimum and maximum bending moments of tower (HB3P)

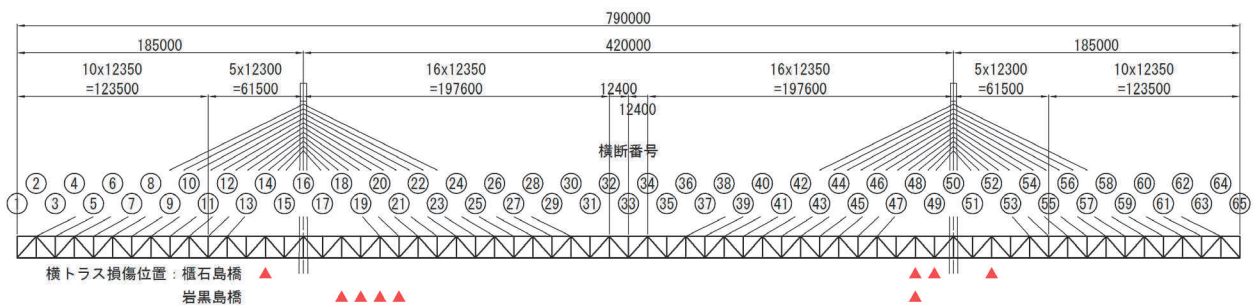


図-8 櫃石島橋及び岩黒島橋における損傷位置

Fig.8 Damaged portions in Hitsuishijima and Iwakurojima Bridges

ストッパー杓との相対変位の減少が遅くなり、減衰定数 $h=2\%$ の場合よりも遅い時間により大きな最大変位が生じることを確認した。ただし、最大変位時においても、補剛トラス桁とストッパー杓とが衝突しないことを確認した。

次に、スプリング杓の減衰が補剛トラスの断面力に与える影響として、主構トラス上弦材及び下弦材の軸力、塔柱の面外曲げモーメント、横トラス下弦材の面内曲げモーメントに着目し、比較した。櫃石島橋で伏在逆断層地震時には、減衰定数 $h=0\%$ のときに主構トラス上弦材及び下弦材で軸力増加が確認できたが、その変化量は小さかった。すなわち、主構部材の軸力についてはスプリング杓の減衰による影響は小さかった。塔柱においては、図-7に示すとおり減衰定数 $h=0\%$ の方が塔基部で面外曲げモーメントが増加するものの、塔中間から上方では明確な面外曲げモーメントの増加は見られなかった。横トラス下弦材については主構トラスの傾向と同様で、大きな変化はなかった。

解析の結果、部材における応答値やその傾向に違いがあるものの、スプリング杓の減衰が期待できないことで新たに損傷が生じる部材はなかった。よって、補強設計については当初設計と同様にスプリング杓の減衰を考慮した照査結果に基づいて実施した。

3.7 補強検討

本橋梁の損傷箇所を図-8に示す。許容値を超過する部材は塔近傍の横トラス下弦材の一部であり、東南海・南海地震時に応答値が最大となった。局部座屈を考慮した許容圧縮応力度は、部材の幅厚比で決まり、幅厚比の小さい横トラス下弦材のウェブで許容値を超過した。

また、許容値を超過する横トラス下弦材の下り線側は、列車荷重を載荷した側である。そこで、横トラス断面内での対称性を考慮して、図-9に示すとおり鉄道上り線側の横トラス下弦材にも補強を行うものとした。

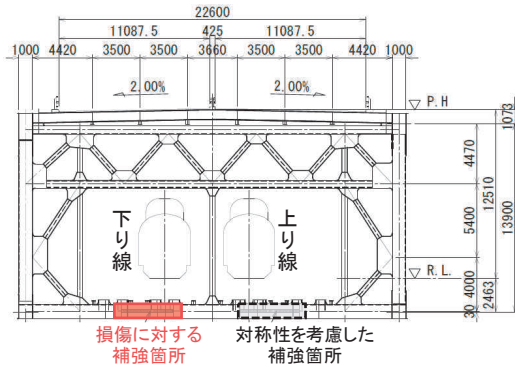


図-9 トラス断面における補強箇所
Fig.9 Retrofitted portions of transverse truss

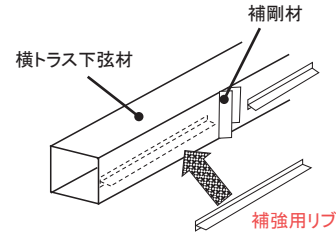


図-10 補強方法
Fig.10 Seismic retrofit of lower main chords

4. 耐震補強設計

鋼部材に対する標準的な補強工法としては、リブ補強、あて板補強、座屈防止部材の追加設置が考えられるが、横トラス下弦材はウェブに作用する圧縮応力度が局部座屈を考慮した許容圧縮応力度を超過することにより損傷が生じるため、許容圧縮応力度の低減を緩和することができるリブ補強を採用した(図-10)。

IB4Pは、隣接の与島橋との掛け違い橋脚であるが、本照査結果の方が応答値が大きかったため、設計においては本照査結果を基に、アラミド繊維巻立て補強を採用した。

5. おわりに

耐震性照査の結果、櫃石島橋及び岩黒島橋は一部の横トラス下弦材を補強することにより、所要の耐震性能を確保できることが確認できた。本橋梁の耐震補強工事は平成31年度に実施される予定である。

平成25年度から着手してきた瀬戸大橋の耐震性照査、補強設計については、平成29年度で全て完了し、耐震補強は平成32年度の完成を目指して実施中である。今後は西瀬戸自動車道における長大橋耐震検討を進めるととも

に、陸上部橋梁の耐震設計への支援も着実にやっていく。

謝辞

本耐震性能照査及び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、貴重な意見を頂いた。ここに記して深く謝意を表す。

参考文献

- 1) 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) 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、遠藤和男:耐震補強検討に用いる大規模地震動の設定、本四技報、Vol.33、No.111、pp.18-23、2008.9
- 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、pp.36-37、2011.9
- 6) 鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等設計標準・同解説、2012.9
- 7) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編、pp.176-181、2012.3

瀬戸大橋吊橋のグレーチング閉塞に伴う 耐風安定性検討

Aerodynamic stability evaluation for Seto-Ohashi suspension bridges with closed open gratings

花井 拓 Taku Hanai

長大橋技術センター
防食・耐風グループサブリーダー

竹口 昌弘 Masahiro Takeguchi

長大橋技術センター
防食・耐風グループリーダー

町田 陽 Akira Machida

長大橋技術センター
防食・耐風グループ

概要

瀬戸大橋吊橋三橋（下津井瀬戸大橋、北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋）の道路床版中央分離帯部及び路肩部に設置されているグレーチングについては、耐風安定化部材の役割を果たしているものの、維持管理上の課題となっている。そこで、このグレーチングを閉塞し、維持管理性を改善することを目的として、耐風安定性の検討を行った。評価の方法としては、明石海峡大橋の検討段階において開発された三次元フラッター解析手法を用いた。中央分離帯部のグレーチングについては、側径間全範囲に加えて、中央径間の一定の範囲において閉塞可能であることが分かった。また、センターバリアを中央径間の一定の範囲に設置することにより、全範囲の中央グレーチングを閉塞することが可能であることが分かった。

Open gratings are installed in the center divider and side strips of the road decks of three suspension bridges of the Seto-Ohashi Bridges (Shimotsui-Seto, Kita Bisan-Seto and Minami Bisan-Seto Bridges) to secure the aerodynamic stability of the bridges. However, they are burden in maintenance stage at the same time. In order to close these open gratings to enhance maintainability, aerodynamic stability evaluation is conducted. As an evaluation method, three-dimensional flutter analysis that was developed during the design stage of the Akashi Kaikyo Bridge is used. By the evaluation, it is found that the center divider gratings in whole of the side spans and the some portions of center spans can be closed. In addition, with the center barriers installed in the some portions in centers spans, whole center divider gratings can be closed.

1. はじめに

瀬戸中央自動車道の海峡部9.4kmに架かる長大橋6橋を主として構成される瀬戸大橋のうち、吊橋は下津井瀬戸大橋（中央支間長940m）、北備讃瀬戸大橋（中央支間長990m）、南備讃瀬戸大橋（中央支間長1,100m）の3橋（以下「瀬戸大橋吊橋」という。）である（図-1）。補剛桁断面はトラス形式であり、上層を道路、下層を鉄道が利用する二層構造となっている（図-2）。瀬戸大橋吊橋の耐風安定性については、道路床版の中央分離帯部及び路肩部にグレーチング（以下それぞれ「中央グレーチング」、「路肩グレーチング」という。）を設けることで確保している。グレーチングに関連した維持管理上の課題として、1) 維持修繕工事において一時的かつ部分的にグレーチングを閉塞するなどした場合の橋梁の

耐風安定性が確認されていないこと、2) 自動車からの落下物などが中央グレーチングから落下し鉄道の運行に影響を与える可能性があることなどがあげられる。

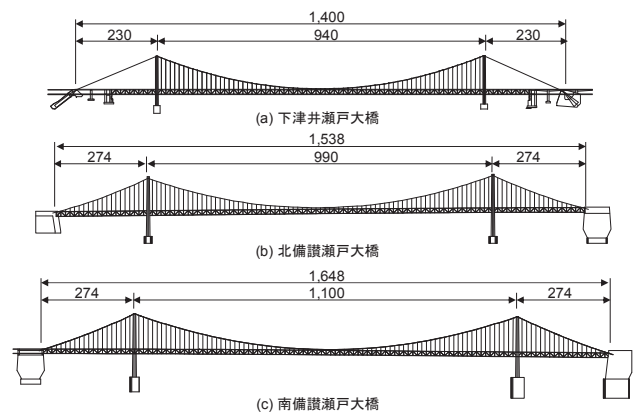


図-1 瀬戸大橋吊橋一般図 (単位:m)

Fig. 1 Seto-Ohashi suspension bridges (unit: m)

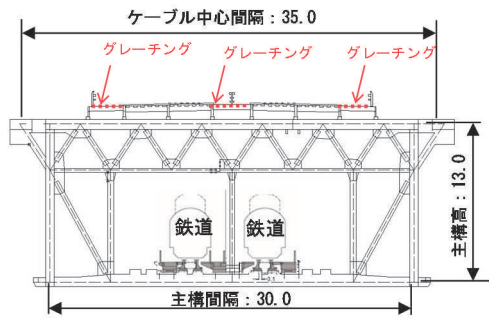


図-2 補剛桁断面図 (単位: m)
Fig.2 Cross section of stiffening girder (unit: m)

瀬戸大橋吊橋では、設計時点において二次元剛体模型による耐風安定性の照査が実施されているが、ここでは基本的に全ての桁断面は同一であり、最低次の曲げ/ねじれ振動モードを対象とすることが前提となっている。対称1次モードを考えたとき、支間中央ではモード値が最大となるため耐風安定性に大きな影響を及ぼすものと考えられるが、モードの節となる主塔近傍の断面は発生する空気力も小さく耐風安定性に影響を及ぼさない可能性があると考えられる。すなわち、耐風安定化部材の必要範囲は、橋軸方向で変化するものと考えられる。

一方、瀬戸大橋のあとに建設された明石海峡大橋の検討段階においては、三次元性を考慮した耐風安定性照査法が確立されており、この手法はその後の国内外の長大橋に適用されている。そこで、瀬戸大橋吊橋の維持管理性の改善を目的に、耐風安定化対策として設置している路面のグレーチングの橋軸方向配置が橋梁全体の耐風安定性に与える影響について三次元フラッター解析手法を用いて解析し、維持管理の最適化について検討を行った。

なお、本検討については、横浜国立大学(勝地弘教授)との共同研究として実施しており、風洞試験を横浜国立大学、フラッター解析を本四高速という分担で行っている。

2. 検討の方法

橋軸方向に断面が変化した場合の橋梁全体の耐風安定性は、三次元性を考慮して評価する必要があるが、その方法としては、以下の2種類があげられる。

- a. 三次元弾性模型による全橋模型試験
- b. 三次元フラッター解析

前者は、多くの時間と費用を要するとともに、明石海峡大橋等の全橋模型試験で使用した大型風洞実験施設が撤去されているため、今回の検討は後者で実施した。

フラッター解析実施時に必要となる空気力係数(三分力係数及び非定常空気力係数)を二次元剛体模型による風洞試験により測定した。一連の風洞試験の実施にあたっては、「本州四国連絡橋風洞試験要領(2001)¹⁾」を基本的に適用した。

2.1 風洞試験

フラッター解析に必要となる空気力係数を二次元剛体模型による風洞試験により測定した。瀬戸大橋吊橋では、補剛桁や鋼床版の形状が全ての橋において共通であるため、ここで計測された空気力については、全ての橋のフラッター解析で共通して用いるものとした。なお、瀬戸大橋吊橋の桁断面は管理路の位置などが非対称で配置されているため、建設時の風洞試験結果を参考に、耐風安定性の面では不利となる東風のケースとした。

風洞試験は横浜国立大学都市イノベーション研究院の橋と自然研究室が保有する水平回流型ゲッチンゲン風洞を使用し、模型縮尺は風洞閉塞率を考慮して1/80とし、模型長は1.25mとした。風洞内への模型の設置状況を写真-1に示す。

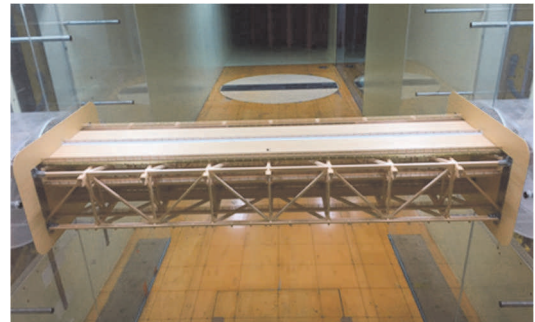


写真-1 二次元風洞模型 (縮尺 1/80)
Photo 1 Two-dimensional wind tunnel test model (scale: 1/80)

(1) バネ支持試験

フラッター解析で使用する空気力の計測に先立ち、断面の基本的な空力特性を把握することを目的として、表-1に示す条件によるバネ支持試験を実施した。振動数は南備讃瀬戸大橋のものを使用した。

表-1 バネ支持試験条件

Table 1 Condition of spring supported test

	実橋	模型		誤差 (許容値 ^{*1)})
		所要値	計測値	
主構幅 B (m)	30.0	0.375	0.375	0%
主構高 D (m)	13.0	0.1625	0.1625	0%
質量 m (kg/m)	40.63 × 10 ³	6.348 [7.936]	[8.095]	+2% (≤2%)
極慣性 モーメント (kgm ² /m)	7.630 × 10 ³	0.1863 [0.2328]	[0.2281]	-2% (≤2%)
固有 振動数 (Hz)	たわみ	0.166	—	1.869 風速倍率 7.11
	ねじれ	0.329	—	3.296 風速倍率 7.99
	振動 数比	1.98	1.98	1.76 -11% ^{*2} (≤5%)
対数 減衰率	たわみ	0.03	0.03	0.0322 +0.0022 (±0.005)
	ねじれ	0.03	0.03	0.0263 -0.0037 (±0.005)

*1: 風洞試験要領¹⁾に示される許容値である

*2: 極慣性の相似を優先したために振動数比は許容値を下回っている

[] 書きは模型長(1.25m)辺りの値である

(2) 三分力係数

明石海峡大橋に対する一連の検討において、長大橋の耐風安定性の検討にあたっては、風荷重による三次元的な変形を考慮する必要があることが明らかとなっている。そこで、フラッター発生時の変形状況を再現するため、静的三分力係数の計測を実施した。

静的空気力の計測は、迎角-10度から+10度の範囲を1度ピッチとし、2風速（8m/s, 12m/s）で実施した。計測した空気力は式(1)から式(3)により無次元化し、三分力係数を算出した。

$$C_D = \frac{P_D}{0.5 \rho U^2 D L} \quad (1)$$

$$C_L = \frac{P_L}{0.5 \rho U^2 B L} \quad (2)$$

$$C_M = \frac{P_M}{0.5 \rho U^2 B^2 L} \quad (3)$$

ここで、 C_D 、 C_L 、 C_M は、それぞれ抗力係数、揚力係数、空力モーメント係数、 P_D 、 P_L 、 P_M は、それぞれ抗力、揚力、空力モーメント、 ρ は空気密度、 U は風速、 L は模型長、 D は模型高さ、 B は模型幅である。なお、一般的に抗力係数は投影面積で無次元化することとなっているが、橋軸方向に断面を変化させるフラッター解析実施の際に、適用断面に応じて解析モデルの断面積を節点ごとに変化させるのは非効率的であるため、いずれの断面も桁高を代表長とした。

(3) 非定常空気力係数

非定常空気力は、航空機の空力弾性問題を取り扱ってきた空力弾性学の分野においては古くから研究が行われ、気流に対する抵抗が小さくなる流線形をした航空機の振動翼が受ける非定常空気力については理論的な解が得られている。しかし、橋梁のような一般構造物はその機能によって種々の形状を持ち、非流線形であるために周囲の気流は剥離しており、その非定常空気力を理論的に求めることができないため、実測による把握が行われている。今回は、橋梁構造物の非定常空気力係数の推定手法としてモード分解再構成法を用いることとした²⁾。

モード分解再構成法における、曲げとねじれの2自由度連成振動系に関する運動方程式の定式化を式(4)に示す。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = [F]\{\ddot{u}\} \quad (4)$$

ここに、

$$[M] = \begin{bmatrix} m & 0 \\ 0 & I \end{bmatrix}, [C] = \begin{bmatrix} 2mh_z\omega_z & 0 \\ 0 & 2Ih_\theta\omega_\theta \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} m\omega_z^2 & 0 \\ 0 & I\omega_\theta^2 \end{bmatrix}, [F] = \begin{bmatrix} L_z & L_\theta \\ M_z & M_\theta \end{bmatrix}$$

$$L_z = -\pi\rho B^2(L_{zR} + iL_{zI}),$$

$$L_\theta = -\pi\rho B^2(L_{\theta R} + iL_{\theta I}),$$

$$M_z = -\pi\rho B^4(M_{zR} + iM_{zI}),$$

$$M_\theta = -\pi\rho B^4(M_{\theta R} + iM_{\theta I})$$

ここで、 m : 単位長さあたりの質量、 I : 単位長さあた

りの極慣性モーメント、 ω_z 、 ω_θ : 鉛直、ねじれ振動の固有振動数である。 L_{zR} 、 L_{zI} : j 自由度の振動に伴う非定常揚力実部、虚部の非定常空気力係数、 M_{zR} 、 M_{zI} : j 自由度の振動に伴う非定常空力モーメント実部、虚部の非定常空気力係数、 j : 振動自由度 (Z (鉛直)、 θ (回転))。

1断面、1迎角あたり8つの非定常空気力係数が無次元風速の関数として算出されることになる。

2.2 フラッター解析

2.1で得られた空気力と瀬戸大橋吊橋の全ハンガー格点を再現した全橋骨組モデル（図-3）を用いて三次元フラッター解析を実施した。解析は、本四高速保有のフラッター解析プログラムを使用した。このプログラムは、桁、ケーブル及び主塔に作用する非定常空気力を考慮し、任意の風速における振動性状と対数減衰率をモーダル法により算出するものであり、風荷重による構造の静的変形は大変形理論を適用している。なお、本プログラムは、明石海峡大橋をはじめとする大型風洞実験施設における全橋模型試験に対応したフラッター解析で使用し、試験結果を精度良く再現できることを確認済みのプログラムである。

解析で考慮した構造減衰は、瀬戸大橋の設計時に用いられた耐風設計基準(1976)・同解説³⁾に従い、いずれの振動モード形においても0.03とした。

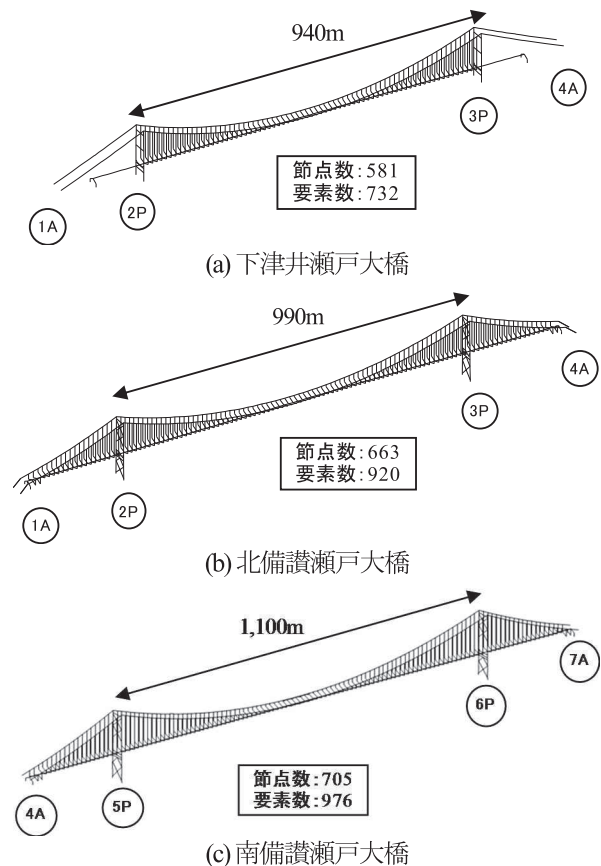


図-3 フラッター解析モデル

Fig. 3 Flutter analysis models

フラッター解析に先立ち、作成した解析モデルの妥当性を検証するため、建設時の固有値解析結果との比較を行った。それぞれの結果は、表-2に示すとおりである。フラッター解析においては強風時の挙動ということでセンターステイロープは無視したモデルを用いた。下津井瀬戸大橋においては、建設時のデータがセンターステイロープ有りのものであったため、まずセンターステイロープ有りのモデルで確認を行い、フラッター解析においてセンターステイロープを削除して実施した。今回の解析結果は、建設時のものを良く再現しており、解析モデルの妥当性が確認された。

表-2 固有値解析結果

Table 2 Eigen value analysis result

振動数 (Hz)		下津井	北備讃	南備讃
水平	対称	0.106 (0.107)	0.087 (0.088)	0.076 (0.076)
	逆対称	0.259 (0.257)	0.210 (0.212)	0.176 (0.176)
鉛直	対称	0.202 (0.202)	0.171 (0.173)	0.167 (0.166)
	逆対称	0.152 (0.160)	0.158 (0.147)	0.135 (0.133)
ねじれ	対称	0.375 (0.374)	0.347 (0.355)	0.327 (0.329)
	逆対称	0.535 (0.521)	0.470 (0.482)	0.451 (0.453)

※上段：本検討（固有値解析結果）、下段：建設時（固有値解析結果）

※下津井瀬戸大橋の固有値解析結果は、センターステイロープ有り、その他は無し値。

3. グレーチング閉塞可能範囲の検討

中央グレーチングを対象として、どの程度の範囲まで閉塞が可能かをフラッター解析によって確認した。対象とした断面を図-4に示す。現状の一般部である中央グレーチングと路肩グレーチングを有する断面（断面1）、断面1の中央グレーチングを閉塞した断面（断面2）を基本とした。また、下津井瀬戸大橋と北備讃瀬戸大橋では、一部でグレーチングを全て閉塞した全幅鋼床版の断面（断面3）や、断面3に加えて鉄道桁の側面と下面に防音壁を設置した断面（断面4）もあるため、これらの断面についても計測した空気力を検討に用いた。

3.1 断面の基本特性

(1) バネ支持試験

断面の基本特性を確認するために行ったバネ支持試験結果を図-5に示す。図中、風速は実橋換算風速で示す。フラッター発現風速が100m/sを上回るものは全て100m/sでプロットしている。現状断面である断面1は南

備讃瀬戸大橋の照査風速（79.1m/s）を大きく上回り、十分な耐風性を有していることを確認した。一方、中央グレーチングを閉塞した断面2は正迎角（+3度、+5度）で耐風性が悪化する傾向を示した。特に迎角+3度では照査風速を下回っており、中央グレーチングは、正迎角における耐風安定性の確保に寄与していることを確認した。また、全幅鋼床版である断面3でも同様に+3度で耐風性が悪化する傾向は同様であり、鉄道防音壁を有する断面4に至っては、-3度～+3度の範囲で照査風速を満足しないものであった。

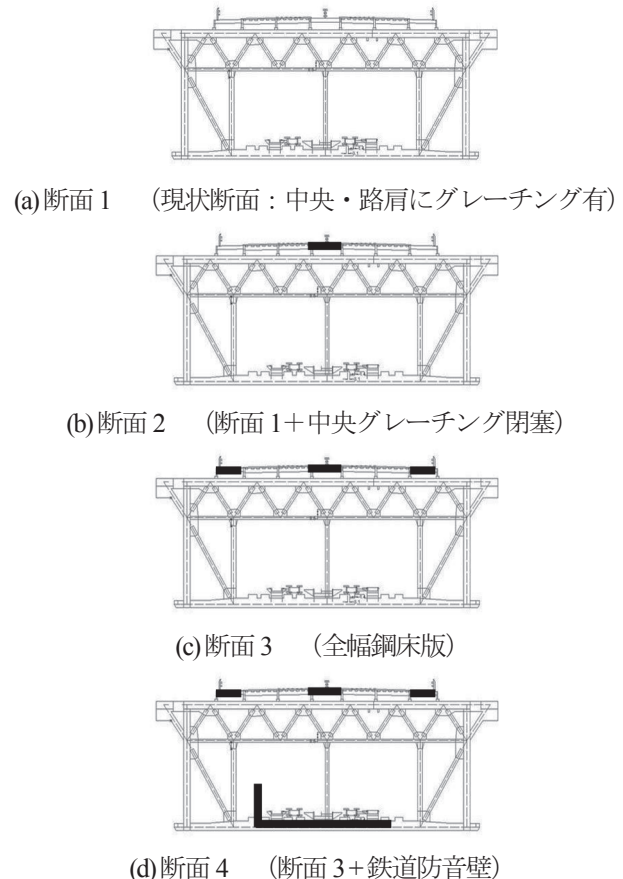


図-4 検討対象断面
Fig. 4 Studied cross sections

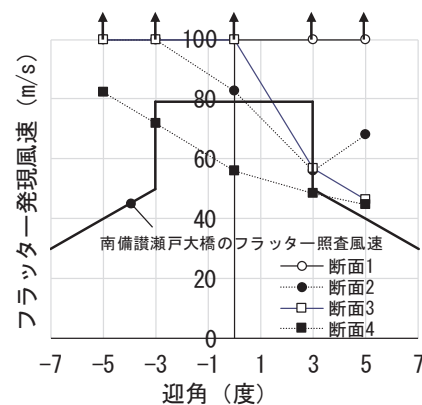


図-5 バネ支持試験結果
Fig. 5 Spring supported test result

(2) 三分力係数

風洞試験によって計測された三分力係数を図-6に示す。ここでは、断面1と断面2のみ比較する。揚力係数については、断面2が断面1よりも勾配が大きく絶対値が大きくなる傾向にあるが、その他の係数についてはほぼ同等であった。

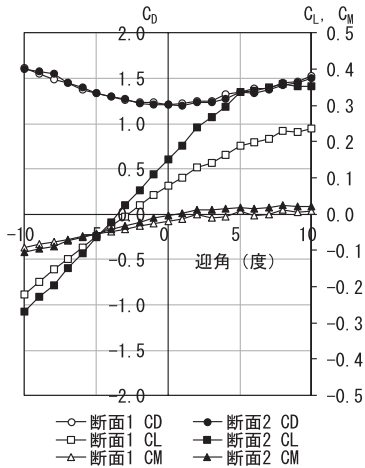


図-6 三分力係数
Fig. 6 Coefficients of three component force

(3) 非定常空気力係数

断面1と、断面2について、迎角3度における非定常空気力係数を図-7に示す。同定した結果に多少のばらつきはあるが、おおむね最大2次の多項式で回帰できることがわかる。ここで、 M_{ZR} が低風速でゼロに漸近していないが、自励作用に対する影響が小さいと考えられることから、後述のフラッター解析でもそのままの値を使用した。

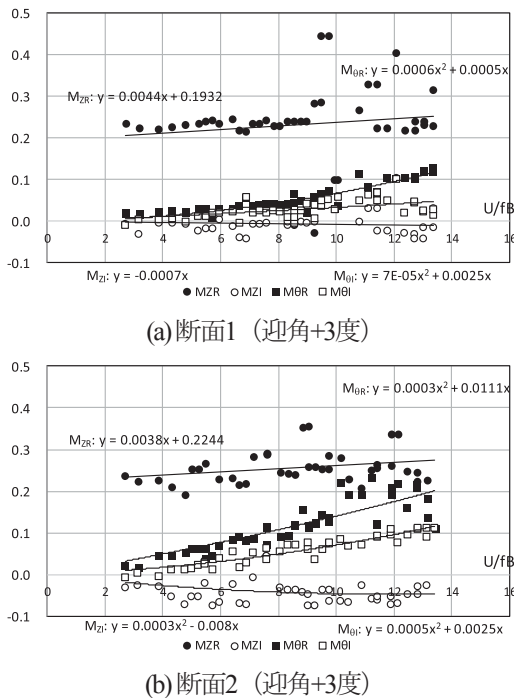


図-7 非定常空気力係数
Fig. 7 Coefficients of unsteady aerodynamic force

風洞試験により計測された非定常空気力係数の妥当性を確認するため、バネ支持試験諸元による二次元フラッター解析を実施した。解析結果と風洞試験結果を比較した結果は図-8に示すとおりである。図中において、フラッター発現風速が100m/s以上となる結果は全て100m/sでプロットしてある。図より、同定された非定常空気力係数はバネ支持試験の結果を良く再現していると考えられる。

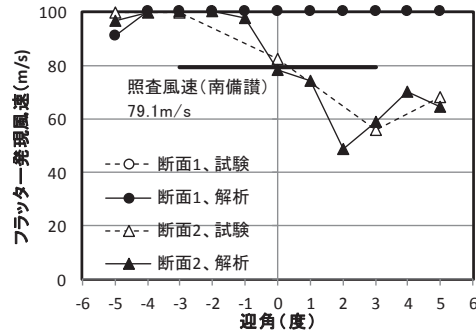


図-8 フラッター発現風速の比較
Fig. 8 Comparison of flutter wind speed

3.2 中央グレーチング閉塞可能範囲の検討

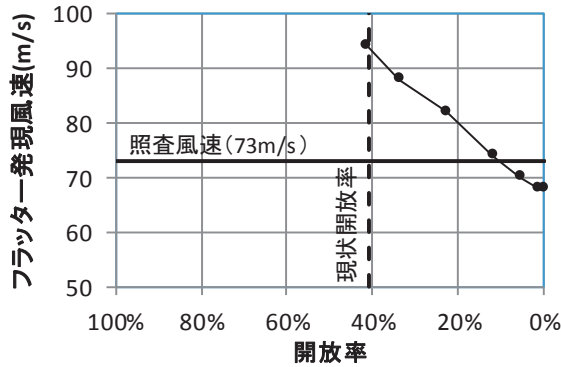
風洞試験により得られた空気力係数を用い、三次元フラッター解析を実施した。中央グレーチングが閉塞できる範囲を確認することを目的に、側径間から順次断面2を適用し、最終的に全径間断面2となるよう、パラメトリック解析を行った。ここでは、開放率を式(5)で定義した。

$$\text{開放率} = \frac{\text{路肩} \cdot \text{中央グレーチングの区間}}{\text{補剛桁全区間}} \quad (5)$$

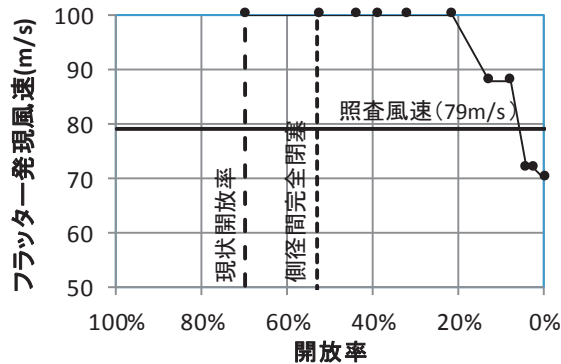
図-9に開放率とフラッター発現風速の関係を示す。下津井瀬戸大橋は側径間と側径間から数パネルの範囲において、全幅鋼床版に加えて、鉄道防音壁を両側に有する断面などが混在している(現状開放率41%)が、側径間が耐風安定性に与える影響は小さいと考え、これらの範囲は全て断面3(全幅鋼床版)とした。また、北備讃瀬戸大橋は起点側の側径間と中央径間の一部において断面4、断面3を用いている(現状開放率70%)ため、これらの空気力を用いて解析を行った。全てのデータはバネ支持試験で耐風性が悪化することが確認された迎角3度を対象にした。全径間中央グレーチングを閉塞した場合には照査風速を満足しないことが確認された。照査風速を満足する開放率としては、下津井瀬戸大橋では12%以上、北備讃瀬戸大橋では8%以上、南備讃瀬戸大橋では38%以上となった。

最も振動の大きくなるモードの腹の部分に耐風性に優れた断面を用いれば橋梁全体の耐風安定性が向上することが考えられる。図-10に、今回の解析における代表的なフラッター発現時のモード形を示す。下津井瀬戸大橋ではねじれ対称1次が、南備讃瀬戸大橋においてはねじれ逆対称1次がフラッター発現時のモード形となってい

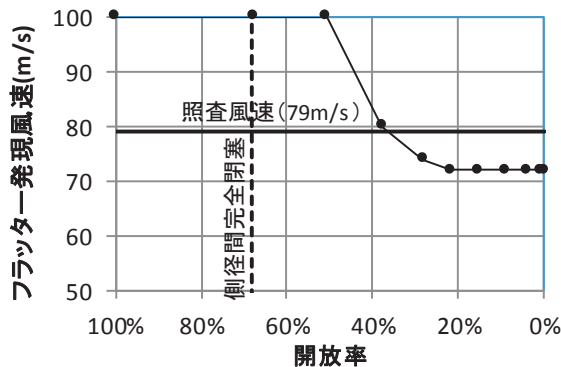
る(図-10(a)、(d))。下津井瀬戸大橋のねじれ対称1次モードでは中央径間中央部が腹となるため開放率の低下に伴いフラッター発現風速が低下しているのに対し、南備讃瀬戸大橋のねじれ逆対称1次モードは中央径間中央部が節となるため、低開放率(0~20%)において(照査風速は下回っているものの)フラッター発現風速の低下はほとんどない。このような場合、モードの腹である中央径間の1/4点、3/4点に断面1を配置する方が有利と考えられる。南備讃瀬戸大橋について検討した結果この近傍に断面1を配置することにより開放率を11%まで低減できることが確認された。



(a) 下津井瀬戸大橋



(b) 北備讃瀬戸大橋



(c) 南備讃瀬戸大橋

図-9 開放率とフラッター発現風速(迎角+3度)

Fig. 9 Opening ratio and flutter speed (Angle of attack: +3 degree)

一方、北備讃瀬戸大橋においては、開放率10%程度で一度フラッター発現風速の低下が緩やかになるものの5%程度で急激に発現風速が低下する。同橋では、開放

率5%程度まではフラッター発現モード形が逆対象1次ねじれモード(図-10(b))であったのが、それ以下の開放率では対象1次ねじれモード(図-10(c))に変化している。中央径間中央部に断面2の配置が進むにつれて、この部分に鈍感な逆対象1次モードに取って代わり、耐風性が急激に悪化した対称1次モードが支配的になったものと考えられる。

最適な断面2の配置を図-11に示す。

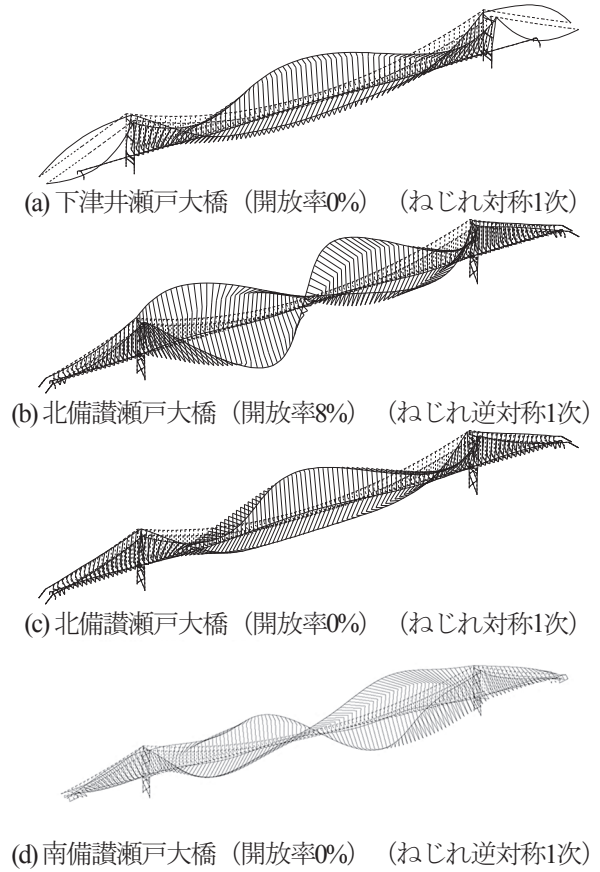


図-10 フラッター発現時のモード形(迎角+3度)

Fig. 10 Flutter mode shape (Angle of attack: +3 degree)

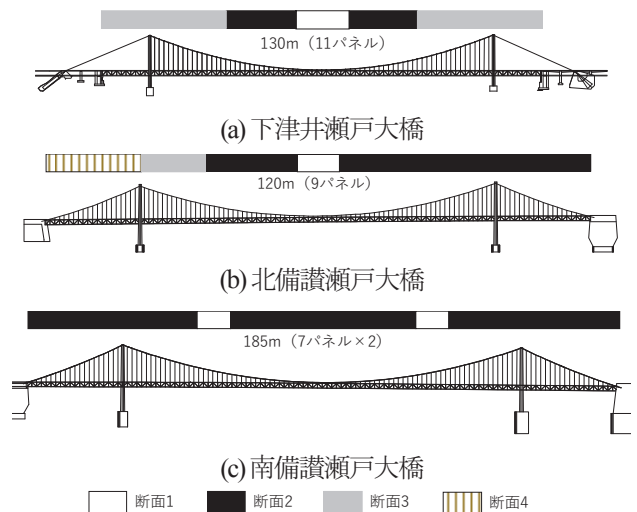


図-11 中央グレーチング閉塞可能範囲

Fig. 11 Center grating closable range

4. センターバリア設置による耐風安定性向上の検討

グレーチングの閉塞可能範囲を更に拡大する目的で、耐風安定化部材の追加を検討した。耐風安定化部材としては、既往の研究⁴⁾においてもある程度の効果があることが確認されているセンターバリアとし、中央グレーチングを閉塞した断面2の中央防護柵部分に高さ0.8mの壁を設ける形とした(断面5)(図-12)。

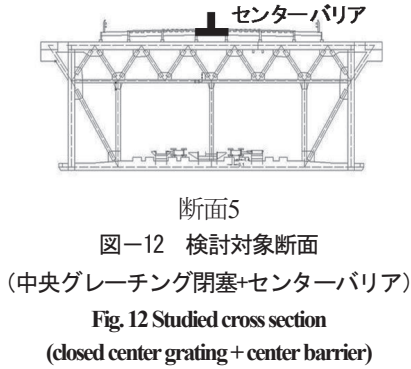


Fig. 12 Studied cross section

(closed center grating + center barrier)

図-13に、断面5のバネ支持試験の結果を断面2の結果とあわせて示す。断面2と比較して耐風性が向上し、照査風速を満足していなかった迎角+3度においても100m/s以上までフラッターが発現しない結果となっている。

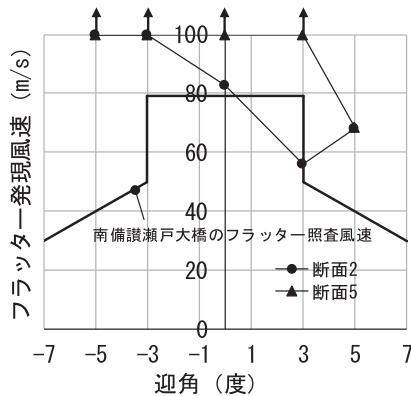


図-13 バネ支持試験結果(断面5)

Fig. 13 Spring supported test result (section 5)

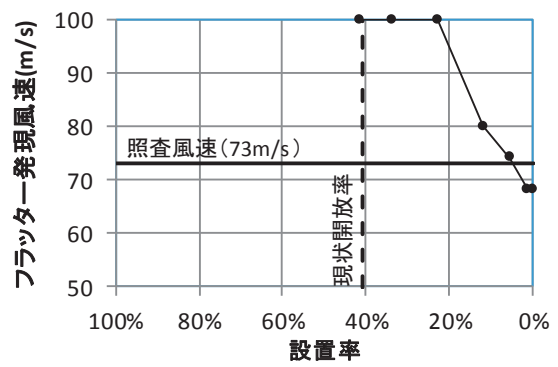
現状断面1となっている箇所を断面5に置き換えたものを基本形として、3.2の検討と同様、側径間から順次断面2を適用し、最終的に全径間断面2となるよう、パラメトリック解析を行った。ここでは、設置率として、式(6)のように定義した。

$$\text{設置率} = \frac{\text{(センターバリアを設置した区間)}}{\text{(補剛桁全区間)}} \quad (6)$$

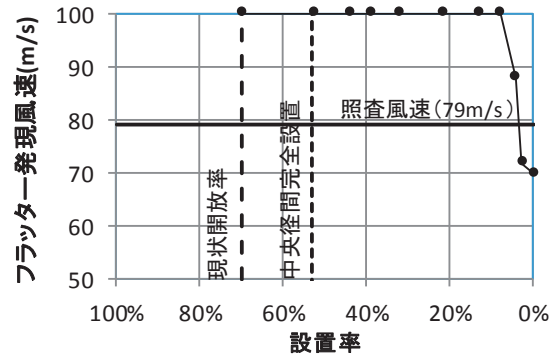
図-14に設置率とフラッター発現風速の関係を示す。

3.2のグレーチング閉塞範囲の検討と同様の傾向となった。照査風速を満足する設置率としては、下津井瀬戸大橋で5%以上、北備讃瀬戸大橋では4%以上、南備讃瀬戸大橋では22%以上となった。また、南備讃瀬戸大橋については、3.2同様、逆対称1次モードの腹の部分に断面5を配置することにより、設置率を14%まで低減できることが確認された。

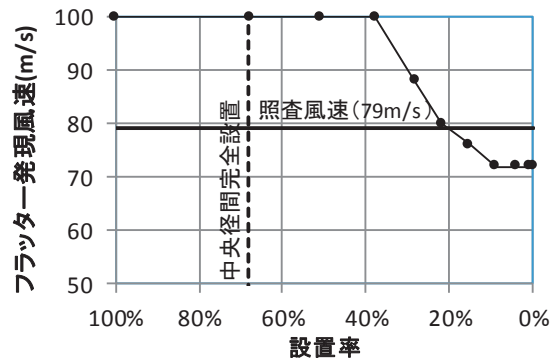
最適な断面配置を図-15に示す。



(a) 下津井瀬戸大橋



(b) 北備讃瀬戸大橋



(c) 南備讃瀬戸大橋

図-14 設置率とフラッター発現風速(迎角+3度)

Fig. 14 Center barrier ratio and flutter speed (Angle of attack: +3 degree)

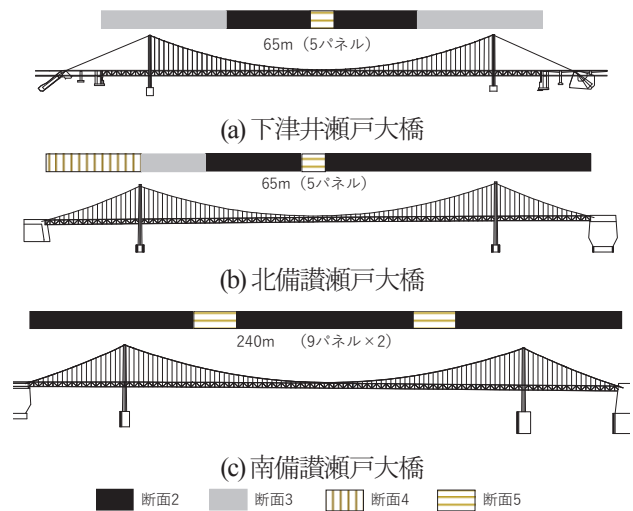


図-15 センターバリア設置範囲

Fig. 15 Center barrier installation range

5. おわりに

瀬戸大橋吊橋の維持管理性の改善を目的に、最新の解析手法により耐風性の再評価を行った。結果として、維持管理上の課題となっている中央グレーチングについては一定の範囲の閉塞が可能であることが分かった。また、センターバリアを中央径間の一定範囲に設置することにより全径間において中央グレーチングを閉塞可能であることが分かった。

一方、トラス補剛桁吊橋のねじれ振動の構造減衰はたわみ振動のそれに比べて小さくなる傾向にあるとの報告もあるため、実際の閉塞範囲の選定にあたっては、実橋梁の減衰特性などを適切に評価する必要がある。

また、グレーチングに代わる閉塞構造については、耐荷重性、車両走行性を満足し、施工性に優れる構造について検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：本州四国連絡橋耐風設計基準（2001）・同解説、2001
- 2) 山田均、宮田利雄：モード分解再構成法による三次元非定常空気力係数測定に関する研究、土木学会論文集、No.543/I-36、pp.209-216、1996
- 3) 本州四国連絡橋公団：耐風設計基準（1976）・同解説、1976.3
- 4) 保田雅彦、平原伸幸：明石海峡大橋補剛桁の耐風性（中間報告）、本四技報、Vol. 13、No.52、pp17-28、1989.10

櫃石島高架橋トラス部、与島橋2径間部の 耐震補強設計

Seismic retrofit design of truss bridges (truss portion of the Hitsuishijima Viaduct
and two-span portion of the Yoshima Bridge)

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani 田村 正 Tadashi Tamura 平山 靖之 Yasuyuki Hirayama

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

長大橋技術センター
総括・耐震グループ

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年度から本格着手しており平成32年度の完了を目指して工事を実施している。その耐震性能照査及び補強設計は、瀬戸大橋を構成する橋梁群を桁橋、トラス橋、吊橋などの橋種ごとに区分し、順次、工事発注工程にあわせて実施してきた。

ここでは、櫃石島高架橋トラス部、与島橋2径間部の2橋のトラス橋の補強設計について報告する。

耐震補強設計では、道路橋示方書に規定される耐震性能2を満足するよう現況照査を行い、補強設計を実施した。櫃石島高架橋トラス部は、トラス桁に免震支承を採用することで、鉄道上空を含む部材補強を低減した。与島橋2径間部は、道路桁に慣性力分散支承を採用することで各部材の補強量を低減した。

Seismic retrofit of the Seto-Ohashi Bridges and approach viaducts, approximately 12km-long highway-railway combined section, has been executed since 2013 and will be completed in 2020. Seismic verification and retrofit design have been conducted for groups of bridges categorized by bridge type such as girder, truss bridge, suspension bridge etc. in accordance with retrofit schedule. This paper presents seismic retrofit design for the truss portion of the Hitsuishijima Viaduct and 2-span portion of the Yoshima Bridge.

Seismic verification and retrofit design have been conducted to achieve Seismic Performance Level 2 specified in the Specification for Highway Bridges. For the truss portion of the Hitsuishijima viaduct, reinforcement of truss members that include the ones over rail lines was reduced by truss girder isolation. And for the two-span portion of the Yoshima Bridge, reinforcement of truss members was reduced by distribution of inertia for road girders.

1. はじめに

瀬戸大橋を構成する橋梁のうち、トラス橋（櫃石島高架橋トラス部、与島橋、番の州高架橋トラス部）は、平成25年度から耐震性能照査を開始した。

耐震性能照査の結果、平成27年度当初に、比較的耐震対策が容易な与島橋3径間部と番の州高架橋トラス部を、同年度末に残る櫃石島高架橋トラス部（以下「櫃石島Vaトラス」という。）と与島橋2径間部（以下「与島2径間」という。）が工事発注された。

本文は、櫃石島Vaトラスと与島2径間の耐震性能照査及び補強設計について報告するものである。

なお、瀬戸大橋は、道路橋示方書¹⁾（以下「道示」という。）の適用外の長大橋が多く、道路鉄道併用橋

の特殊性なども鑑み、本四耐震補強検討委員会を設立し、専門の学識経験者等による審議を行い耐震性能照査、補強検討及び設計を実施した。

2. 橋梁概要

櫃石島Vaトラス及び与島2径間の橋梁一般図を図-1に、橋梁概要を表-1に示す。

この2橋に適用された耐震基準は、表-1に示す道示耐震設計編（昭和55年版²⁾及び本四耐震基準³⁾であり、これらの基準では、現在の道示耐震設計編⁴⁾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ため、ある程度の補強が必要となることが予想された。

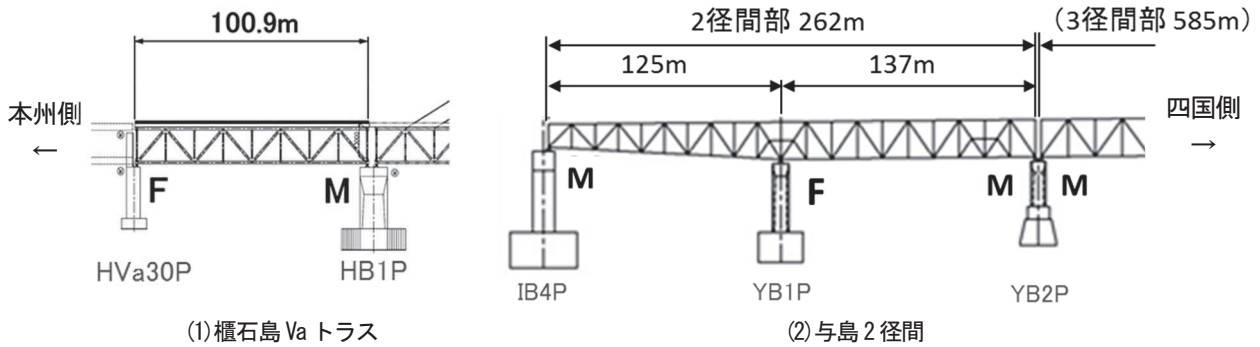


図-1 橋梁一般図

Fig.1 General view

表-1 橋梁概要

Table 1 Outline of bridges

橋名	櫃石島高架橋(トラス部)	与島橋
形式	鋼単純トラス橋	鋼2+3径間連続トラス橋
支間割(m)	100.9m	125.0+137.0+175.0+245.0+165.0
道路床版形式	鋼床版(舗装厚75mm)上下線分離構造	鋼床版(舗装厚75mm)上下線分離構造
主構(m)	主構幅:27.5m, 主構高:13.0m	主構間隔:28~32, 主構高:11.95~37.5
下部工形式	壁式構造(HVa30P) RC一層ラーメン構造(HB1P) 直接基礎	RC一層ラーメン構造 直接基礎
適用耐震基準	道路橋示方書・同解説V耐震設計編(道路協会、S55) 耐震設計基準・同解説(本四公団、S52)	道路橋示方書・同解説V耐震設計編(道路協会、S55) 耐震設計基準・同解説(本四公団、S52)

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5)から8)を参照されたい。

3. 解析条件の設定

3.1 入力地震動

瀬戸大橋地点での設計地震動の概略⁵⁾は以下のとおりである。地震動は、瀬戸大橋地点の地盤構造、近隣の断層等を考慮し、断層モデルにより定めた大規模地震とし、工学的基盤 $V_s=1.5\text{km/s}$ 、 2.5km/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。解析に用いた入力地震動は、櫃石島Vaトラス部及び与島2径間とも直接基礎であるため、工学的基盤で設定された地震動を基に一次元波動伝播解析(SHAKE)で算出した。耐震性能照査に用いた地震動を図-2に示す。地震動は、地盤条件から櫃石島Vaトラスが基礎ごとに異なり、与島2径間が各基礎共通である。

櫃石島Vaトラスは、道示⁹⁾適用範囲の支間長であるため、道示に倣い橋軸方向、橋軸直角方向にそれぞれ独立して入力した。与島2径間は、道示⁹⁾の適用範囲を超える支間長を有する同橋3径間部と整合させ、地震動の3次元的な挙動を考慮し、水平2方向に鉛直を合わせた3方向同時入力とした。なお、伏在断層については、逆断層、横ずれ断層それぞれ2波の平均値で照査を行った。

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
慣性力の上限値: 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

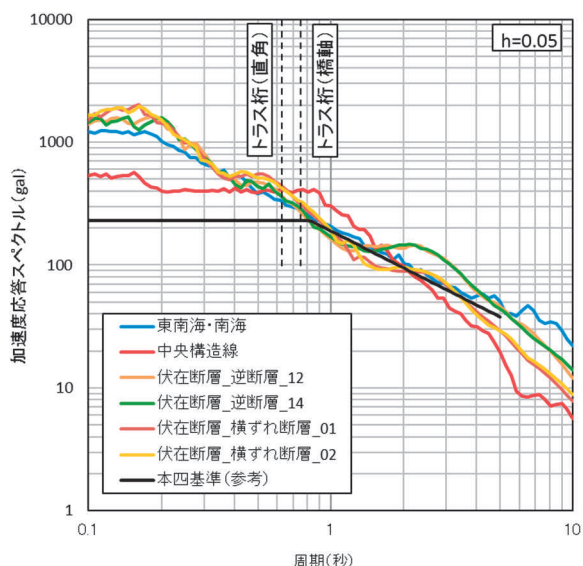
列車荷重の載荷位置については、上り線側、下り線側載荷の比較計算の結果、櫃石島Vaトラスは下り線、与島橋は上り線載荷とした。

3.3 動的解析

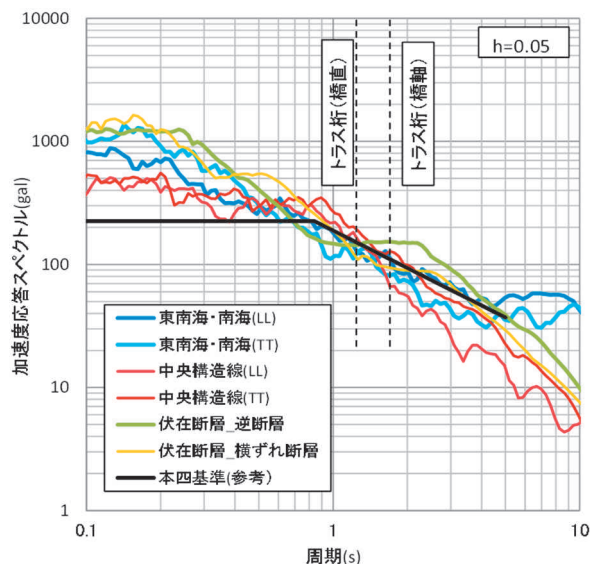
(1)解析モデル

耐震性能照査、補強設計に用いる解析モデルは、力の伝達等を忠実に再現するため、全トラス部材について2軸の曲げと軸力の影響を考慮できるファイバー要素でモデル化した。さらに曲げの影響がある上部構造の格点間要素分割は、部材軸方向に平均して格点間で4分割し細分化した。また道路桁については、上下線を梁要素で設定し、全支承をモデル化することで挙動を再現した。

RC橋脚はコンクリート要素と鉄筋要素で構成されたファイバー要素にてモデル化した。表-2に各部材のモデル化、図-3に櫃石島Vaトラスの例に解析モデルの概要を示す。



(1) 檜石島 Va トラス (HVa30P)



(2) 与島橋 (全基礎共通)

図-2 入力地震動

Fig.2 Input seismic motions

表-2 部材のモデル化

Table 2 Analytical model of members

上部工	主構トラス、横トラス	ファイバー
	上下横構、プレーキトラス	ファイバー
	トラス支承	線形ばね
	道路桁	弾性はり要素
	道路桁支承	線形ばね
	鉄道桁	弾性はり要素
下部工	鉄道桁支承	線形ばね
	橋脚	ファイバー
基礎工	フーチング	剛部材
	直接基礎	浮上りを考慮した非線形集約ばね
隣接橋		死荷重反力および質量を考慮

表-3 減衰定数

Table 3 Damping constant

部 材	モデル化	減衰定数	
主構	ファイバー	0.02	
道路桁	線形はり要素	0.02	
鋼製支承	線形ばね要素	0.00	
RC橋脚	ファイバー	0.02	
フーチング	rigid要素	0.00	
基礎-地盤系	直接基礎	非線形集約ばね	0.10

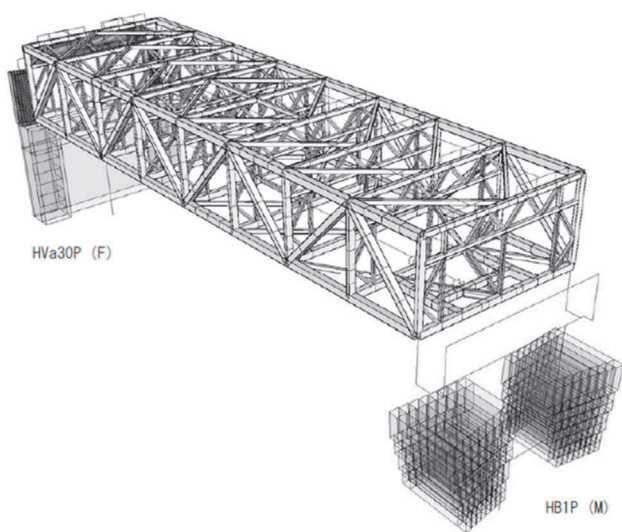


図-3 解析モデル (ファイバーモデル表示)

Fig.3 Analytical model

(2)材料構成則

1)鋼部材

鋼部材のファイバー要素は座屈による圧縮側降伏応力度の低減を考慮し、圧縮側と引張側で非対称のモデルとした。この非線形材料構成則は、全体座屈と局部座屈の連成を考慮した、道示鋼橋編⁹⁾の(3.2.1)式を用いて圧縮側降伏点を低減することで設定した。

2)RC橋脚 (コンクリート部材)

コンクリートの材料構成則は、道示耐震設計編⁹⁾におけるコンクリートの応力-ひずみ曲線とした。ただし、帯鉄筋端部のフック形状などが道示の規定に準拠していない為、横拘束筋の効果を無視し、応力-ひずみ曲線の最大応力度をコンクリートの設計基準強度とした。

(3)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⁹⁾を参考に、表-3のとおりとした。

(4)解析手法

解析は材料非線形と幾何学的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-4 固有周期
Table 4 Natural period of bridges

(1) 櫃石島 Va トラス (単位: 秒)

部位	主たる振動方向	
	橋軸方向	橋軸直角方向
トラス桁本体	0.755(1次)	0.629(2次)
HVa30P	0.573(3次)	0.184(14次)
HB1P	0.187(13次)	0.177(16次)

(2) 与島 2 径間 (単位: 秒)

部位	主たる振動方向	
	橋軸方向	橋軸直角方向
トラス桁本体	0.961(7次)	0.835(9次)
IB4P	0.404(25次)	0.273(54次)
YB1P	0.372(29次)	0.273(16次)
YB2P	0.334(34次)	0.194(437次)

なお、与島2径間はYB2P橋脚を3径間部と共有することから、相互の影響を考慮し3径間部も合わせた与島橋全橋で地震応答解析を行った。

(5) 固有値解析結果

表-4に対象橋梁の固有値解析結果を示す。図-2の加速度応答スペクトル図にトラス桁の固有周期も示しているが、櫃石島Vaトラスでは、トラス桁で約0.8秒（橋軸）から0.6秒（橋軸直角）程度であり、300から400gal程度の加速度応答が生じることが予想される。与島2径間では、トラス桁で約1.0秒（橋軸）から0.8秒（橋軸直角）程度であり、100から300gal程度の加速度応答が生じることが予想される。

4. 耐震性能照査

4.1 照査項目と許容値

(1) 鋼部材の照査

鋼部材は、道示鋼橋編⁹⁾の「4.3軸方向力と曲げモーメントを受ける部材」の(4.3.1)~(4.3.5)式で照査した。

(2) RC橋脚の照査

RC橋脚は道示耐震設計編⁴⁾に従い、曲げとせん断の照査を行った。

(3) 支承部の照査（道路桁支承、トラス支承）

動的解析によって得られる支承移動量、支承反力について、許容値（移動可能量、支承耐力（割増係数1.7を考慮した応力度））に対する照査を行った。

4.2 耐震性能照査結果

図-4に損傷部位を明示した耐震性能照査結果、表-5に構造部位ごとの最大応答値が生じる地震波とその最大

値（最大応答値/許容値）を示す。

櫃石島Vaトラスは、上下弦材などの主構には損傷が見られないが、き電線を支持する横トラスの上路下弦材及び斜材が一部損傷する結果となった。この損傷は、主に圧縮時の座屈安定照査によるものである。

8径間連続構造である道路桁鋼床版では、HVa30P上の固定支承の耐力不足、その他の可動支承（橋軸方向）で橋軸直角方向の耐力が一部で不足する結果となった。

なお、最大応答が生じる地震波は、トラス桁ではほぼ中央構造線地震波である。

与島2径間は、き電線を支持する横トラス上路下弦材の他、上弦材及び垂直材の一部及び上下横構などが多数損傷する結果となった。この損傷は、櫃石島Vaトラスと同様に、主に圧縮時の座屈安定照査によるものである。

10径間連続構造の道路桁鋼床版では、両端のIB4P、YB2P上の固定支承の耐力不足、中間のYB1P上付近の可動支承で、橋軸直角方向で耐力が不足する結果となった。

最大応答が生じる地震波は、部位によって異なる結果であった。

5. 耐震対策の工法検討

5.1 耐震対策の工法比較

(1) 全体系対策と部材補強対策について

耐震対策は、一般的に免震、制震、長周期化、構造系の変更などの工法で橋全体として応答を低減し耐震性能を向上させる全体系対策と、損傷部材を直接補強する部材補強対策に大別される。表-6に国内のトラス橋で比較的多く採用されている耐震対策の方法を示す。

今回対象のトラス橋を始め、瀬戸大橋を構成する大規模な鋼橋（吊橋、斜張橋、トラス橋）は、部材補強対策だけでは補強規模、数量が膨大となる可能性がある。

よって合理的な耐震対策を行うため、まずは全体系対策を検討し、なおも耐力を超過する部位に部材補強対策を組み合わせることを基本とした。

(2) 施工上の制約について

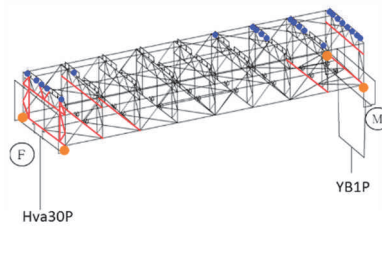
対象橋での施工は、トラス断面内の鉄道営業線への影響を考慮する必要がある。図-5に示すき電線を支持する鉄道直上のトラス部材は、鉄道運行が終了する深夜の僅かな時間しか施工できないことから、実質的に補強不可として扱うこととした。またそれ以外の鉄道上に位置する部材でも、安全対策を含めた施工上の制約を考慮し、できる限り補強が不要となる対策を選定する必要がある。

よって、一般的に考慮する施工難易度などの他、以上の施工条件を加味して耐震対策を選定することとした。

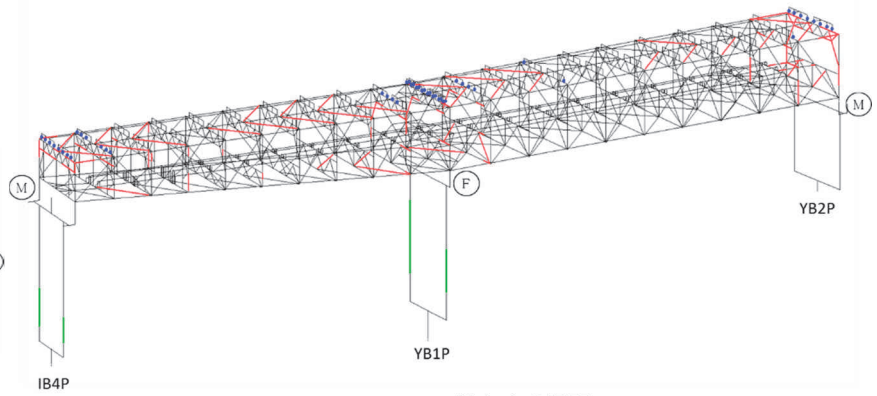
(3) 各橋の耐震対策の工法比較

櫃石島Vaトラスは、き電線を支持する鉄道直上の横トラス上路下弦材の部材補強を回避するため、全体系対

損傷部位
 ●: 道路桁支承
 ●: トラス桁支承
 —: トラス部材
 —: 橋脚



(1) 櫃石島 Va トラス



(2) 与島2径間

図-4 耐震性能照査結果

Fig.4 Results of seismic performance verification

表-5 耐震性能照査結果総括表

Table 5 Summary of seismic performance verification

(1) 櫃石島 Va トラス					(2) 与島2径間				
項目	部位	照査	最大値 (最大応答/許容)	最大応答値 決定波形	項目	部位	照査	最大値 (最大応答/許容)	最大応答値 決定波形
トラス部材	上弦材	軸力+曲げ	0.51	中央構造線(橋軸)	トラス部材	上弦材	軸力+曲げ	2.30	中央構造線
	下弦材		0.56	東南海・南海(橋軸直角)		下弦材		0.76	中央構造線
	斜材		0.64	中央構造線(橋軸直角)		斜材		0.70	伏在逆断層(橋軸直角)
	垂直材		0.93	中央構造線(橋軸直角)		垂直材		1.70	中央構造線
	横トラス		2.43	中央構造線(橋軸直角)		横トラス		2.79	伏在逆断層(橋軸直角)
	上横構		0.86	中央構造線(橋軸直角)		上横構		1.45	伏在横ずれ断層(橋軸直角)
	下横構		0.98	中央構造線(橋軸直角)		下横構		1.40	伏在横ずれ断層(橋軸直角)
	その他		1.44	中央構造線(橋軸直角)		その他		2.60	中央構造線
トラス支承	HVa30P	変位	(固定支承)	中央構造線	トラス支承	IB4P	変位	1.00	中央構造線
	HB1P		0.74	中央構造線(橋軸)		YB1P		(固定支承)	
	HVa30P	支承耐力	2.39	中央構造線(橋軸直角)		YB2P	0.78	中央構造線	
	HB1P		1.59	中央構造線(橋軸直角)		IB4P	0.62	伏在横ずれ断層(橋軸直角)	
道路桁	支承	変位	NG(橋軸18個)	中央構造線(橋軸)	YB1P	支承耐力	0.82	中央構造線	
		支承耐力	NG(19個)	各地震波	YB2P		0.58	伏在横ずれ断層(橋軸直角)	
RC橋脚	HVa30P	曲げ	0.62	中央構造線(橋軸)	道路桁	支承	変位	OK	各地震波
		せん断	0.61	中央構造線(橋軸)			支承耐力	NG(47個)	各地震波
	HB1P	曲げ	0.52	伏在逆断層(橋軸)	RC橋脚	IB4P	曲げ	0.66	中央構造線
		せん断	0.59	伏在逆断層(橋軸)			せん断	1.38	伏在横ずれ断層(橋軸直角)
	曲げ	0.85	中央構造線	YB1P		曲げ	0.85	中央構造線	
	せん断	1.69	伏在逆断層(橋軸直角)	せん断		1.69	伏在逆断層(橋軸直角)		

表-6 トラス橋に用いられる耐震対策

Table 6 Seismic retrofit measures for truss bridges

①免震・制震デバイス			
制震ダンパー	支承部せん断パネルダンパー	ガセット部せん断パネルダンパー	座屈拘束ブレース(BRB)
<ul style="list-style-type: none"> 既設可動支承部へダンパーを設置し、ダンパーのエネルギー吸収による地震力の低減、地震時変位量の低減を図る工法 可動脊の橋脚も地震時水平力を分担し、固定脊の橋脚の分担が小さくなる 	支承部に設置した、せん断パネルの塑性せん断変形による履歴減衰による地震エネルギー吸収により地震時慣性力、変位の低減を図る工法	斜材端部に設置したせん断パネルの塑性せん断変形により斜材の軸方向力制御、座屈を防止するとともに、履歴減衰による地震エネルギー吸収を図る工法	地震時に塑性変形する芯材と芯材の座屈変形を拘束する座屈拘束材からなるブレース材を横構等に設置し、芯材の塑性化の履歴減衰により地震エネルギー吸収を図る工法
②支承交換※		③部材補強	備考
慣性力分散工法	免震工法	「当て板補強」により断面増加等の補強を直接行う工法と「補強リブの追加」により局部座屈強度を向上させる断面パラメータを改善する工法	※②支承交換は、トラス桁支承、道路桁(鋼床版)支承の双方に適用可能
既設可動支承もしくは全支承を分散支承に取り替え、地震時慣性力を分散させる工法	既設支承を免震支承に取替、長周期化による地震時慣性力の低減 ・免震支承のエネルギー吸収による地震時慣性力の低減を図る工法		

策を基本とし、道路桁支承免震化+部材補強、トラス桁支承免震化の2案を比較検討した。

与島2径間においても、き電線を支持する鉄道直上の部材補強を回避する必要があること、損傷部材が多数あることから全体系対策により損傷部材を最小限に低減することとし、道路桁の慣性力分散化、制震ダンパー設置、

座屈拘束ブレース(以下「BRB」という。)を比較検討した。なお、与島2径間は、トラス桁支承に損傷がないこと及び、必要規模の免震支承が存在しないことから、トラス桁支承免震化は、検討の対象外とした。

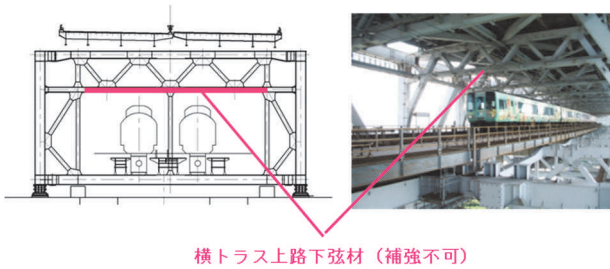


図-5 トラス断面内の施工条件
Fig.5 Working condition inside of truss bridge

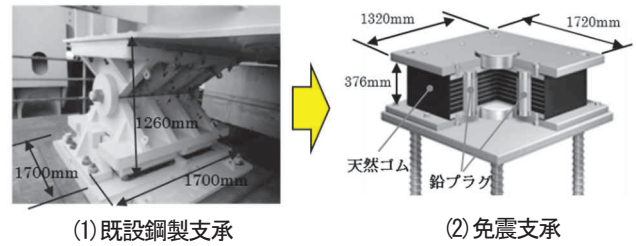


図-6 トラス桁支承免震化
Fig.6 Replacement of truss girder supports with isolation bearings

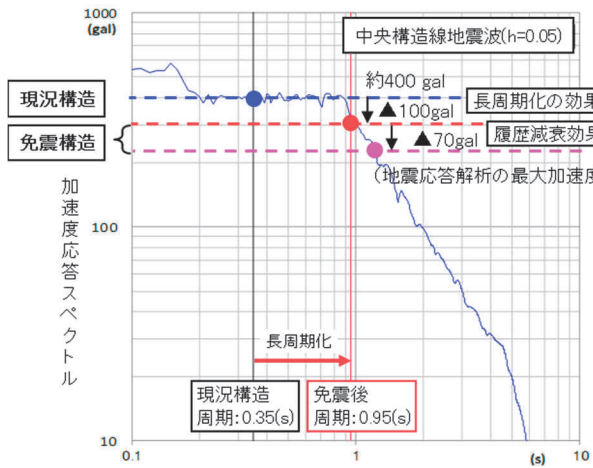


図-7 加速度応答値の低減効果
Fig.7 Reduction effect of acceleration response

6. 耐震補強設計

6.1 櫃石島Vaトラス

(1) 全体対策の考え方

櫃石島Vaトラスの耐震対策は、全体系対策として道路桁支承免震化とトラス桁支承免震化を主に検討し、鉄道直上を含め部材補強を大幅に削減でき施工性と経済性に優れたトラス桁支承免震化を採用することとした。

トラス桁支承免震化は、図-6に示すとおり、HVa30P及びHB1P上の4基の鋼製支承を鉛プラグ入り積層ゴム支承に交換し、固有周期の長周期化と履歴減衰の効果により、各部材の応答値を耐力以下に低減するものである。

現況照査において最も影響が大きい中央構造線地震を例にしたトラス桁支承免震化による加速度応答スペクトルの低減効果を図-7に示す。加速度応答スペクトルにおいて、固有周期の長周期化で約100gal、免震支承の履歴減衰で約70gal、合計で約170galの応答値の低下が見込める。この応答値の低減効果により鉄道直上を含む各部材の耐力超過が解消し、道路桁の固定支承を除き、部材の補強対策が不要となることが分かった。図-8(1)にトラス桁支承免震化における補強箇所を示す。

なお、トラス桁支承免震化については、大規模トラス橋や道鉄併用橋での採用実績がないことから、施工性や安全性についての課題を更に検討した。

(2) トラス桁支承免震化の課題検討

トラス桁支承免震化における主な課題は、支承交換時におけるジャッキアップの実現性と、ジャッキアップ時及び完成後の鉄道走行の安全性であった。

ジャッキアップの実現性は、支承交換時の反力を、死荷重、活荷重に加えて1支承線上の不均等係数を見込んで油圧ジャッキの能力を決定することで、施工の確実性を高めることとした。また、ジャッキアップ位置は、橋座部のスペースや占用物件への影響等の施工性の他、トラス桁本体のあて板補強や橋座部の押し抜きに対するせん断補強が可能な限り最小限となる箇所を選定した。

ジャッキアップ時の鉄道走行への影響は、鉄道桁支承とジャッキの配置等を考慮した軌道のこう上量を解析し、ジャッキアップ量をHVa30Pで16mm、HB1Pで38mm以下に制限することで鉄道走行の安全性が確保できることを確認した。一方、免震化後の鉄道走行の安全性は、L1地震時の列車挙動シミュレーションを行い、車輪の軌道からの上昇量が鉄道基準値の70mmを下回る1mm未満で、脱線の危険性がないことを確認した。

(3) 落橋防止システム

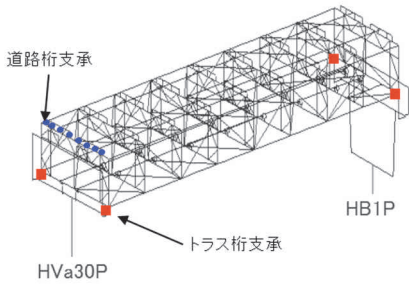
当該橋梁は、HVa30P及びHB1P橋脚の桁かかり長が、落橋防止構造を省略できる目安とされる必要桁かかり長の1.5倍以上を確保していることから、落橋防止構造を省略した。段差防止構造は、支承高さが高いことから既に両橋脚にコンクリートブロックが設置されている。しかし、接点となるトラス桁側の補強が未実施であったため、段差防止用とジャッキアップ用を兼ねて部材の補強を行うこととした。

6.2 与島2径間

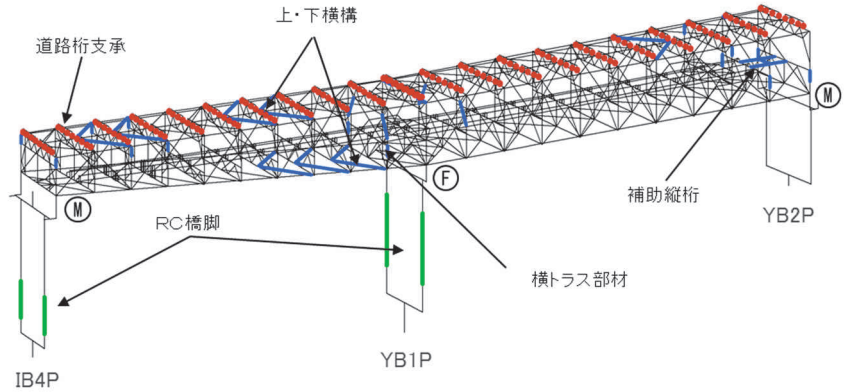
(1) 全体系対策の考え方

与島2径間の耐震対策は、全体系対策として、道路桁支承慣性力分散化、制震ダンパー設置、BRBを主に検討し、一部鉄道上空の部材補強が必要なものの全体として部材補強を削減できる道路桁支承慣性力分散化を採用することとした。

- 道路桁支承補強
- 道路桁支承慣性力分散化
- トラス桁支承免震化
- トラス部材補強
- 橋脚せん断補強



(1) 櫃石島 Va トラス



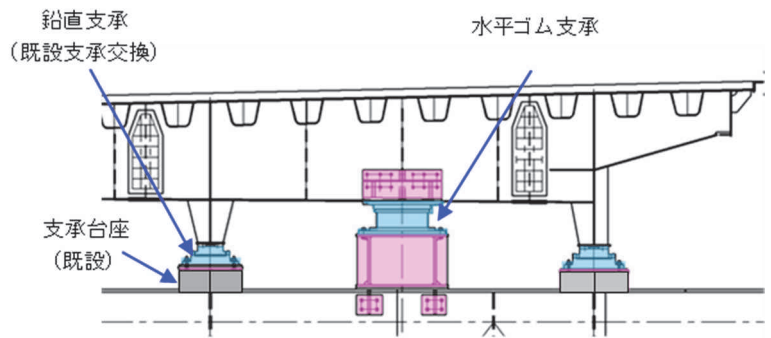
(2) 与島2径間

図-8 耐震補強箇所図

Fig.8 Seismic retrofit members



(1) 既設支承構造



(2) 機能分離型慣性力分散支承

図-9 道路桁支承慣性力分散化

Fig.9 Distribution of inertia for road girders

道路桁支承慣性力分散化は、ゴム支承により道路桁から主構トラスに伝わる慣性力を低減し、各部材の応答値を低下させるものである。図-8(2)に慣性力分散化における補強箇所を示す。支承の交換にあたっては、まず既設鋼製支承を、鉛直・水平機能一体型のゴム支承に交換することを検討したが、必要となるゴムの平面及び断面寸法から、図-9(1)に示す支承台座の大きかりな交換が必要になることが分かった。

このため図-9(2)に示すとおり、鉛直、水平機能を分離して、鉛直機能を既設支承台座を利用したすべり支承が受け持ち、その中間に水平機能を受け持つゴム支承を設置する構造とし、既設構造への影響を抑えて施工性の向上を図ることとした。

また、ゴム支承のバネ定数を最適化するため、図-10に示す、バネ定数を変化させたトラス桁、道路桁の卓越周期と、加速度応答スペクトルとの関係を整理した。

この結果、バネ定数 $K=6000\text{kN/m}$ （支承線）を採用することで、トラス桁の応答が最小となり、き電線を支える鉄道直上の横トラス上路下弦材の損傷回避を含め部材補強を最小限に抑えることが可能となった。

なお、ゴムの材質は、道路桁支承の変位量が小さく免震ゴムによる更なる減衰効果が期待できないため、通常のゴムを採用した。

(2) 部材補強対策の考え方

目標とする耐震性能は、道示耐震設計編⁴⁾に従い耐震性能2であるが、道鉄併用橋であり損傷後の補修が困難であることから、2次部材とされる上下横構などについても補強を行うこととした。また、橋体の左右どちらかの部材のみに損傷が出る場合は、構造的な原因が明らかな場合を除いて左右対称に補強を行うこととした。道路桁支承は、支承線単位での補強及び交換とした。

部材補強対策には、図-11に示すとおり、部材の耐力向上を目的としたあて板補強と、座屈耐力力の向上を目的とした断面パラメータ改善がある。

あて板補強は1部材について補強部材を連続して配置し応力分担させる必要があり、補強が大規模で施工の難易度が高くなる傾向にある。一方、断面パラメータ改善は、道示鋼橋編⁵⁾に示す座屈耐力力の向上が目的のため、1部材について補強部材を連続化させる必要がなく、施工が容易で補強範囲も最小限にできる。

よって本橋の部材補強対策は、断面パラメータ改善とし、既設部材に対する孔開けが少ないリブ補強を基本とした。

なお、橋脚補強は、RC巻立て、鋼板巻立て、連続繊維巻立てを比較し、基礎への影響や海上での施工性を考慮し、連続繊維巻立てを採用した。

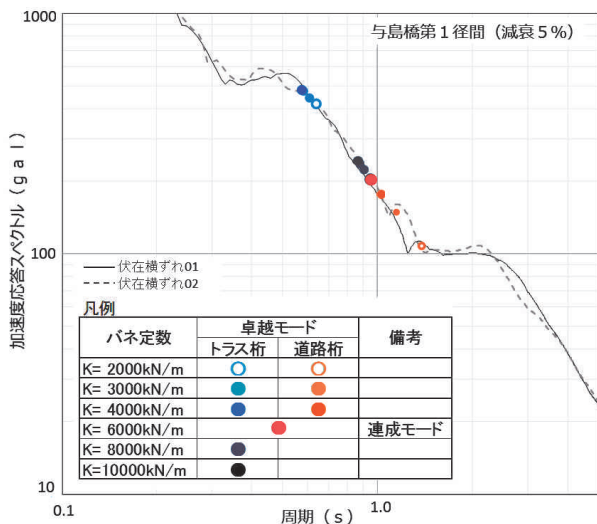


図-10 ゴム支承のバネ定数と加速度応答スペクトル
Fig.10 Spring constant of rubber bearing and acceleration response spectrum

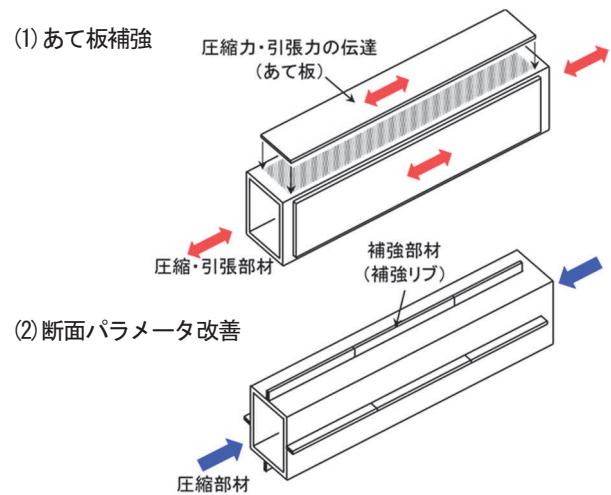


図-11 部材補強対策の工法
Fig.11 Reinforcement methods

(3)部材補強における維持管理性の配慮

当該トラス橋は部材の多くが箱断面で構成されているため、補強材取付ボルトの孔開け時の切り屑等が密閉された部材内に腐食要因として存置されること、施工後にボルト孔周囲から水分が浸入すること等の防せい上の懸念があった。よって、ボルト孔開け後は、部材内の切り屑等を極力取り除き、補強材取付け後は、部材内部を乾燥させシーリングを行い密閉性を確保することとした。

また、点検への配慮として、断面の小さい部材では、補強箇所の1割程度にモニタリング用の点検孔を設け、断面が大きい部材（上・下弦材、斜材）では、密閉ダイアフラムに設けた作業孔（マンホール等）を、点検孔として使用できる蓋構造とした。

(4)落橋防止システム

当該橋梁のIB4P及びYB2P橋脚の桁かかり長は、落橋防止構造を省略できる目安とされる必要桁かかり長の1.5倍以上を確保していることから、落橋防止構造を省略した。段差防止構造については、支承高さが高く支承部損傷時の段差によりトラス部材の座屈・降伏等、主構造の大規模な損傷を起こす可能性があるため、中間支点のYBIPを含め全ての橋脚に段差防止構造を設置することとした。

7. おわりに

瀬戸大橋のトラス橋のうち櫃石島Vaトラスと与島2径間の耐震性能照査、補強設計について報告した。両橋の補強設計では、全体系対策により損傷部位を最小限に低減することで、施工困難部位の部材補強を大幅に回避することができた。両橋で得られた知見は、今後の西瀬戸自動車道の長大橋の耐震性能照査及び補強設計に活用してまいりたい。

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) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編、2012.3
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、1980.5
- 3) 本州四国連絡橋公団：耐震設計基準・同解説、1977.3
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、2012.3
- 5) 福永 勲、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、pp.37-38、2010.9
- 6) 福永 勲、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、pp.36-37、2011.9
- 7) 福永 勲、河藤千尋：瀬戸大橋トラス橋の耐震対策、本四技報、VoL.40、No.125、pp.48-49、2015.9
- 8) 福永 勲、河藤千尋：与島橋3径間部、番の州高架橋トラス部の耐震補強設計、本四技報、VoL.40、No.126、pp.2-9、2016.3
- 9) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編、2012.3

第六伊弉高架橋塗替塗装工事における 素地調整方法の比較検討

Comparison of surface preparation methods for repainting of the 6th Ibi viaduct

貴志 友基 Yuki Kishi

保全部 橋梁保全課長
(前)鳴門管理センター
橋梁維持課長

長尾 幸雄 Yukio Nagao

鳴門管理センター
橋梁維持課長代理

概要

第六伊弉高架橋は、腐食環境の厳しい鳴門岬付近に位置するため、鋼材の塗装は、防食下地に防せい力の高い厚膜型無機ジンクリッチペイント（以下「無機ジンク」という。）を施し、上塗りに塩化ゴム系塗料を用いた塗装系を採用している。近年、無機ジンク内での凝集破壊による塗膜のふくれ・はがれなどを確認したため、無機ジンクを含む旧塗膜全てを除去する塗替塗装を行うこととした。

本文では、第六伊弉高架橋の塗替塗装にあたり、微量ではあるが鉛などの有害物質が旧塗膜に含まれるため、現地施工試験により素地調整方法を比較検討したので結果を報告する。

In the painting system for the 6th Ibi viaduct, thick inorganic zinc rich paint (hereinafter called “inorganic zinc”) which have high corrosion protection ability is used for lower layer, and chloroplane rubber paints are used for upper layer because the 6th Ibi viaduct is located around the Naruto cape with the severe corrosion environment. Recently, repainting with removing all of the old paints was to be done because blistering and peeling by cohesion failure of inorganic zinc were found.

This paper reports comparison results for proper surface preparation methods for the repainting, since old paints include small amount of toxic substance such as lead.

1. はじめに

第六伊弉高架橋は、神戸淡路鳴門自動車道の大鳴門橋から門崎高架橋に続く高架橋として1985年に完成した橋長49mの鋼単純活荷重合成I桁橋である。本高架橋が位置する淡路島側陸上部は、年間を通して海からの強風が吹いているため、飛来塩分が多く厳しい腐食環境となっており（図-1、写真-1）、完成後4年程度で塗膜のはがれなどの変状が確認された。そのため、完成5年後（1990年）には塗替塗装を実施している。しかし、塗替塗装10年後の2000年頃から再び広範囲にわたり塗膜のはがれなどの変状が確認されたことから、今回2回目の塗替塗装を行うこととした。

2. 塗装履歴と塗膜状況

2.1 建設時

塗装面積は3,000m²で建設時の塗装仕様は、下塗りの厚膜型無機ジンクリッチペイント（以下「無機ジンク」という。）、フェノール樹脂系ジンクロメートさび止めペイント（以下「さび止めペイント」という。）及びフェノール樹脂系MIO塗料を工場塗装、中塗り及び上塗りの塩化ゴム系塗料を現場塗装で行うNo.2系¹⁾である（表-1）。

2.2 塗替塗装時

完成4年後の1989年頃から塗膜変状が確認されており、変状内容は、中塗り・上塗り塗膜のはがれ、局部的なさびであった。そこで1990年に上塗りにポリウレタン樹脂塗料を有するc-1系²⁾で全面塗替塗装を実施した(表-2)。この時の素地調整は3種(乾式)であり、動力工具を使用してさび部については、鋼面を露出させ、塗膜はがれ部については、目粗し程度の素地調整を行った。

2.3 近年の塗膜状況

1990年の塗替塗装後10年程度で再び塗膜変状が確認されており、変状内容は、第1層の無機ジンク内での凝集破壊による塗膜のふくれ・はがれや第1層の無機ジンクと第2層のさび止めペイントとの塗膜層間での塗膜のふくれ・はがれであった(写真-2、写真-3)。

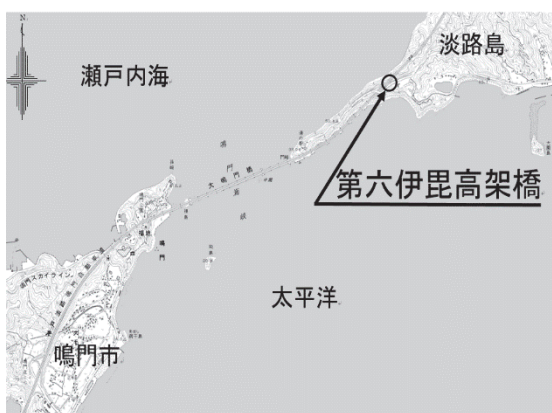


図-1 第六伊弉高架橋位置図
Fig.1 Location of 6th Ibi viaduct



写真-1 第六伊弉高架橋
Photo 1 6th Ibi viaduct

表-1 塗装仕様(建設時 No.2系)

Table 1 Painting system at the construction

種類	各層	塗料名	塗膜厚	
工場塗装	1次素地調整	原板プラスト	-	
		無機ジンクリッチプライマー	(20 μm)	
	2次素地調整	製品プラスト	-	
		第1層	厚膜型無機ジンクリッチペイント	75 μm
	下塗	-	エッチングプライマー	-
		第2層	フェノール樹脂系ジンクロメートさび止めペイント	30 μm
第3層		フェノール樹脂系MIO塗料	60 μm	
第4層		フェノール樹脂系MIO塗料	60 μm	
現場塗装	中塗	塩化ゴム系塗料用中塗	35 μm	
	上塗	塩化ゴム系塗料上塗	25 μm	
総膜厚(素地調整を除く)			285 μm	

表-2 塗装仕様(塗替塗装 c-1系)

Table 2 Painting system for repainting

種類	各層	塗料名	塗膜厚	
現場塗装	素地調整	3種		
	下塗	第1層	変性エポキシ樹脂塗料下塗	50 μm
	中塗	第2層	ポリウレタン樹脂塗料用中塗	30 μm
	上塗	第3層	ポリウレタン樹脂塗料上塗	25 μm
	塗替膜厚			105 μm



写真-2 はがれ(主桁外面ウェブ面)
Photo 2 Peeling on the web of main girder

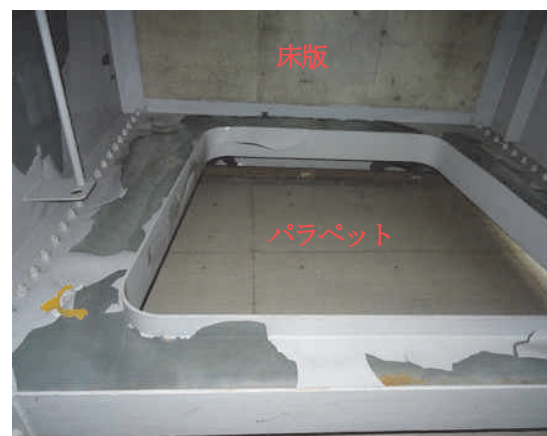


写真-3 はがれ(端横桁ウェブ面)
Photo 3 Peeling on the web of end sway bracing

3. 塗替塗装の種別判定

塗替塗装の種別選定にあたっては、塗膜評価点検を実施し、その結果から「局部補修塗装」、「部分塗替塗装」、「全面塗替塗装」のいずれかで行うこととしている³⁾。今回実施した第六伊弉高架橋の塗膜評価点検では、合計評点「40以上」、塗膜評価「IV」、塗替塗装の実施判定「早急な塗替塗装が必要」(表-3)という結果となったため、図-2のとおり、「全面塗替塗装」と判定した。

表-3 合計評点と塗膜評価及び塗替塗装の実施判定

Table 3 Total points, evaluation of paint and action

合計評点	塗膜評価	塗替塗装の実施判定
10未満	I	点検調査の継続
10~25未満	II	塗替塗装計画の策定が必要
25~40未満	III	計画的な塗替塗装が必要
40以上	IV	早急な塗替塗装が必要

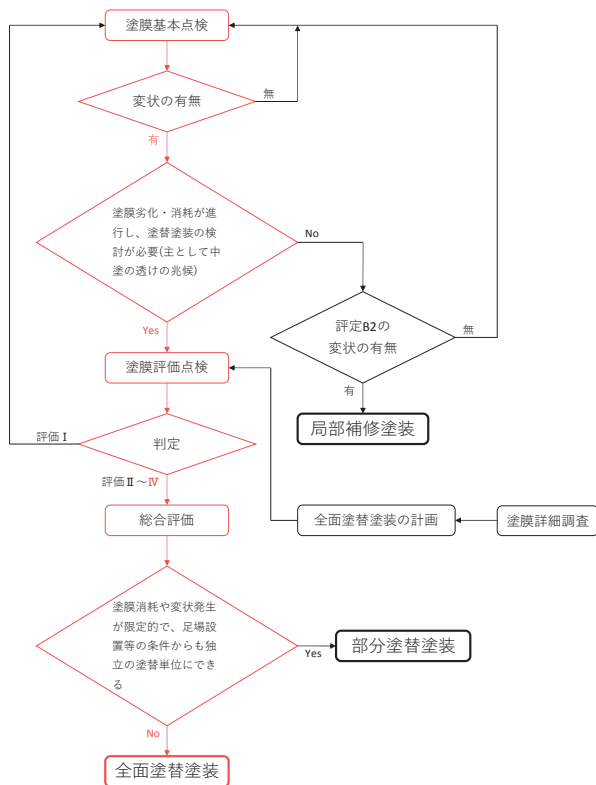


図-2 塗替塗装の種別判定フロー
Fig.2 Flow for selection of repainting works

4. 塗替塗装仕様の選定

今回の塗膜変状は、無機ジンクがはがれた鋼材面への

亜鉛粉末の付着及びさびの発生、塗膜のふくれ・はがれが主桁全体に生じていることから、建設時～前回(1990年)塗替時の旧塗膜全てを素地調整1種により除去し、防食下地に有機ジンクリッチペイント、上塗りに弱溶剤形ふっ素樹脂塗料を有するRc-I系⁴⁾を採用することとした(表-4)。

表-4 塗装仕様(塗替塗装 Rc-I系)

Table 4 Paint system for repainting (Type Rc-I)

種類	各層	塗料名		塗膜厚
		1種		
現場塗装	素地調整			
	第1層	有機ジンクリッチペイント		75 μm
	下塗	第2層	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	120 μm
	第3層	弱溶剤形変性エポキシ樹脂塗料下塗	120 μm	
	中塗	第4層	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料用中塗	30 μm
上塗	第5層	弱溶剤形ふっ素樹脂塗料上塗	25 μm	
総膜厚				370 μm

5. 鉛含有塗膜の素地調整

近年、塗替塗装で素地調整を行う際に、除去対象となる塗膜に鉛が含まれている場合の作業については、労働安全衛生法施行令でいう「含鉛塗料のかき落とし」に該当するため、鉛中毒予防規則に従い、従来の「乾式」ではなく、「湿式」で行うよう規定されている。なお、現場条件によって湿式以外の方法で含鉛塗料のかき落とし作業を行う場合は、換気装置を設け、空気中の鉛濃度が管理基準値以下となるよう努めるものとされている。

今回、素地調整の対象となる塗膜を事前に採取し、成分分析を実施した結果、微量ではあるが鉛が含まれていることを確認している。また、建設時に使用した塗料の成分についての塗料メーカーへの聞き取り調査の結果、エッチングプライマー及び第2層のさび止めペイントに鉛が含まれているという情報を得ている。

6. 素地調整試験

6.1 試験の種類

第六伊弉高架橋の旧塗膜には、エッチングプライマー及び第2層のさび止めペイントに鉛が含まれている。また、エッチングプライマーには、特定化学物質であるクロムも微量ではあるが含まれている。このため、塗替塗装のための素地調整は、湿式によるものとした。

今回、第六伊弉高架橋のうち延長8.5m、面積601m²の範囲において、素地調整方法の比較検討を行うため、表-5に示す4ケースで現地施工試験を行った。

当初、Case1~Case3は、鉛を含んでいるエッチングプライマーまでの塗膜除去を剥離剤(湿式)で行った後、残りの無機ジンクの塗膜除去は乾式による方法とし、Case4については、全塗膜の除去を湿式で行う計画とし

ていた。

表-5 素地調整方法の比較検討試験

Table 5 Comparison test of surface preparation methods

種類	内容
Case1	剥離剤(湿式)+オーブンブラスト(乾式)
Case2	剥離剤(湿式)+バキュームブラスト(乾式)
Case3	剥離剤(湿式)+動力工具(ディスクサンダー等)(乾式)
Case4	湿粒ブラスト(湿式)

しかし、膜厚 390 μ m (建設時+塗替時) を剥離剤 1 回では除去できず、追加として一般部で計 2 回、添接部で計 3 回の剥離剤塗布を行い、塗膜除去を試みたが、最終的には、エッチングプライマーと第 2 層のさび止めペイントが一部残存することとなった (写真-4、写真-5)。



写真-4 剥離剤による塗膜剥離 (初回)

Photo 4 Peeling of coating layer by paint remover (first time)



写真-5 剥離剤による塗膜剥離 (2回目)

Photo 5 Peeling of coating layer by paint remover (second time)

よって、Case1~Case3 の乾式による素地調整については、鉛濃度の低減のため、急きょ、排気装置をトラックに搭載した換気システムを導入して施工を行った (写真-6、写真-7)。



写真-6 排気装置搭載車 (道路上)

Photo 6 Car with an exhaust device (on the road)



写真-7 排気ダクト (足場内)

Photo 7 Exhaust duct (inside the scaffolding)

6.2 試験内容

(1)環境調査

1)空気中濃度測定

空気中濃度測定は、作業環境測定士によって、素地調整作業中の作業足場内で空気中の有害物質 (鉛、クロム) をろ過材 (47mm フィルター) に通して採取した。測定機器であるエアースンプラー (流量計) は三脚を利用して採取面が床に対して垂直となるように固定した (写真-8)。測定高さは、人の口や鼻の高さである 1.5m、20l/min・箇所で10分間吸引した後、ろ過材を密閉して作業環境測定機関に持ち込み、濃度分析を行った。

2)騒音測定

施工位置での作業が政令で定められている特定建設作業であることから、素地調整作業中の騒音測定を実施した。測定箇所は、高架橋足場下橋台前及び中央部で行い、調査方法は、JIS-Z-8731 環境騒音の表示・測定方法に準拠し、最大値、最小値、平均値を測定した (写真-9)。

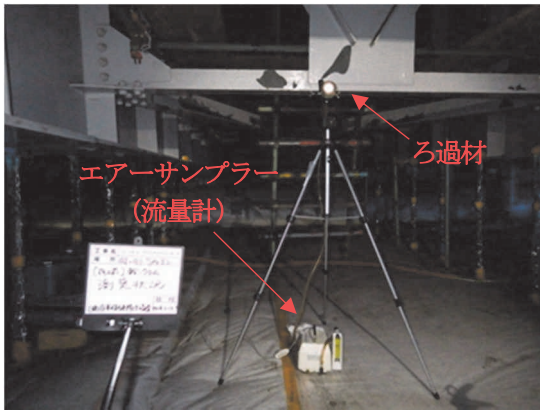


写真-8 空气中濃度測定状況

Photo 8 Consistency measurement of harmful substances in the air



写真-9 騒音測定状況

Photo 9 Noise measurement

(2) 施工性調査

施工性調査は、作業性調査として Case1~Case4 の作業内容ごとに日当たりの作業時間、作業人員、施工面積を記録した。また、粉塵発生状況として足場内外（路上の未供用地）の雰囲気を目視で確認した。素地調整程度は、施工前に試験施工を行い、ISO8501 素地調整判定見本写真を使用し、施工箇所と照合させた。

併せて剥離剤及びプラスト材の使用数量と産業廃棄物処理数量についても調査した。

6.3 試験結果

(1) 環境調査

1) 空气中濃度測定

空气中濃度測定の結果を表-6 に示す。空气中濃度測定では、Case2（剥離剤+バキュームプラスト；換気有り）と Case4（湿粒プラスト；換気無し）では、鉛及びクロムとも管理基準値である $0.05\text{mg}/\text{m}^3$ を下回ったが、Case1（剥離剤+オーブンプラスト；換気有り）と Case3（剥離剤+動力工具；換気有り）については、鉛又はクロムのいずれかが、管理基準値を上回った。ここで Case1（剥離剤+オーブンプラスト；換気有り）において基準値以上のクロムが検出されたのは、剥離剤施工で

残存したさび止めペイントにクロムが含まれているため濃度が高くなったものと思われる。また、Case3（剥離剤+動力工具；換気有り）において鉛の濃度が高くなったのは、動力工具による作業が塗膜表面を少しずつ層状に削り取っていくため、成分採取のタイミングにより採取された成分に偏りがあったことが考えられる。

表-6 空气中濃度測定結果

Table 6 Measured consistency of harmful substances in the air

種類	内容	鉛(mg/m^3)	クロム(mg/m^3)
Case1	剥離剤(湿式)+オーブンプラスト(乾式)	0.036	0.243
Case2	剥離剤(湿式)+バキュームプラスト(乾式)	<0.005	0.005
Case3	剥離剤(湿式)+動力工具(ディスクサンダー等)(乾式)	0.230	0.015
Case4	湿粒プラスト(湿式)	0.019	0.026

2) 騒音測定

騒音測定の結果を表-7 に示す。全ケースの測定はできなかったが、Case4 で政令で定められている特定建設作業の騒音基準値である 85dB（敷地境界、夜間）を超過し、高架橋下の中央部で 95dB であった。この理由は、端部の主桁~足場間のシート養生の隙間からの音漏れと高架橋周辺の3方向が壁で囲まれていることによる音の反響が原因として考えられる。

なお、Case1 では、換気システム導入に伴い周囲をコンパネで覆ったことで、騒音が低減されたと思われる（図-3）。

表-7 騒音測定結果

Table 7 Measured noise

種類	内容	橋台前	中央部
Case1	剥離剤(湿式)+オーブンプラスト(乾式)	81dB	-
Case2	剥離剤(湿式)+バキュームプラスト(乾式)	-	-
Case3	剥離剤(湿式)+動力工具(ディスクサンダー等)(乾式)	76dB	-
Case4	湿粒プラスト(湿式)	85dB	95dB

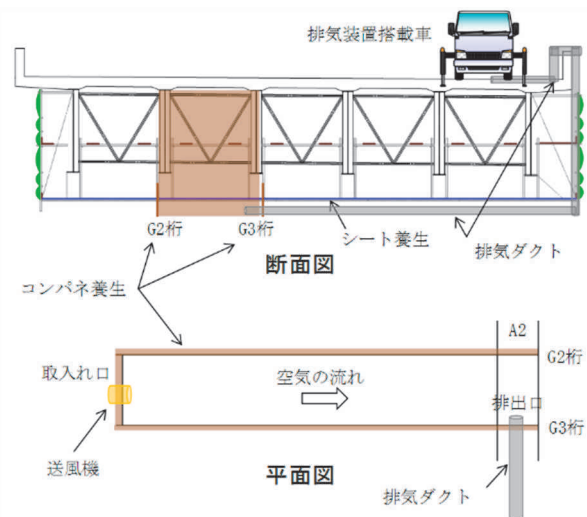


図-3 乾式施工時の作業状況

Fig.3 Protection while dry type surface preparation work

(2)施工性調査

1)作業性調査

作業性調査として Case1～Case4 の作業内容ごとに日当たりの作業時間、作業人員、施工面積の記録を行い、実働時間を 8hr/日として、作業能力 (人/m²) を算出した (表-8)。

表-8 作業性調査結果

Table 8 Productivity of each surface preparation method

種類	内容	作業能力
Case1	剥離剤(湿式)+オープンブラスト(乾式)	0.135人/m ²
Case2	剥離剤(湿式)+バキュームブラスト(乾式)	0.827人/m ²
Case3	剥離剤(湿式)+動力工具(ディスクサンダー等)(乾式)	0.340人/m ²
Case4	湿粒ブラスト(湿式)	0.121人/m ²

・ Case1

剥離剤 (湿式) を使用した作業では、エッチングプライマーを完全に除去することができなかった。そのため、作業足場内の作業箇所をコンパネで覆い、送風機を設置し、排気装置を搭載したトラックを交通規制して本線に配置した。この場合、排気能力から施工面積が小さくなるため、作業効率は悪かった。

・ Case2

バキュームブラストは、筒先でブラスト材などを集塵する構造であり、作業員が素地調整程度を目視しづらいこと、ブラストの噴射圧が通常より低いため、残存塗膜厚によって施工性が大きく左右され、作業効率は最も悪かった。

・ Case3

Case1 と同様な換気システムが必要になること、動力工具で鋼材面を少しずつ層状に削り取ることになり、作業効率は悪かった。

・ Case4

水とブラスト材を同時に噴射する作業であるが、養生シートを二重構造としたことから (図-4)、足場の隙間からのブラスト廃水の漏えいなどは無かった。また、水を含んだブラストであるため、施工後、数時間で鋼材面に戻りさびが発生したが、湿粒ブラストを粗ブラスト (塗膜除去) として行い、仕上げとしてオープンブラスト (乾式) を行えば、最大で5日間ブラスト間隔が開いた場合でも、戻りさびを全て除去可能であることを確認した (写真-10、写真-11)。また、湿粒ブラストで発生する廃水については、水量を調整すれば、廃水はブラスト材に吸水され、足場内に滞留しないことも確認した (写真-12)。よって、Case4 は、塗膜剥離作業を必要としないこと、湿粒ブラストとオープンブラストは、同じ設備による施工が可能であることから、作業効率は良好であった。

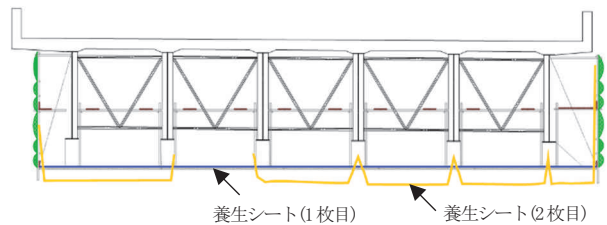


図-4 湿粒ブラスト作業時の養生方法

Fig.4 Protection while wet blasting work



写真-10 湿粒ブラスト4日後

Photo 10 Surface 4 days after wet blasting



写真-11 仕上げ (オープン) ブラスト直後

Photo 11 Surface immediately after finishing blast



写真-12 湿粒ブラスト作業時の足場内

Photo 12 Inside the scaffolding while wet blasting

2) 粉塵発生状況

粉塵発生状況は、Case1～Case3 の乾式方法については、換気システムを導入した状態で粉塵濃度を測定した。表-9 に結果を示す。

- Case1
粉塵が大量に発生し、視界も悪い。
- Case2
粉塵は少量であり、作業環境は良好である。
- Case3
粉塵は少量であり、作業環境は良好である。
- Case4
粉塵が発生するが、ブラスト材が水に覆われているため、Case1 より大幅に少ない (写真-13)。

表-9 粉塵発生濃度
Table 9 Consistency of dust

種類	内容	粉塵濃度
Case1	剥離剤(湿式)+オープンブラスト(乾式)	223.85mg/m ³
Case2	剥離剤(湿式)+バキュームブラスト(乾式)	0.41mg/m ³
Case3	剥離剤(湿式)+動力工具(ディスクサンダー等)(乾式)	0.41mg/m ³
Case4	湿粒ブラスト(湿式)	6.31mg/m ³



写真-13 湿粒ブラスト状況
Photo 13 Wet blasting work

3) 素地調整程度

素地調整程度は、Case1、Case3 及び Case4 については、作業を行いながら近接して素地調整グレードの確認が可能であったが、Case2 については、ノズル先端がリングブラシ (写真-14) で覆われるため、バキュームブラスト中の素地調整グレードは感覚に頼る部分があり、ブラスト後に素地調整グレードを確認する必要がある。また、Case3 では、ディスクサンダーであるため、目視では残存塗膜を全て除去しているように見えるが、微量に残存しているものと思われる。



写真-14 リングブラシ
Photo 14 Ring brush

4) 各種数量

剥離剤及びブラスト材の使用数量と使用後の産業廃棄物処理数量を表-10、表-11 に示す。

剥離剤により発生した産業廃棄物は、成分分析の結果、鉛の量が廃棄物の判定基準 (0.3mg/l) を超過したため、特別管理産業廃棄物 (爆発性、毒性、感染性などにより、人の健康又は生活環境に被害を生じるおそれのあるもの) となった。ブラスト材を使用した産業廃棄物は、成分分析の結果、鉛の量が 0.3mg/l 未満であったため、一般産業廃棄物となった。

表-10 剥離剤産業廃棄物処理数量

Table 10 Volume of industrial waste by paint remover

作業内容	施工面積	使用数量	産業廃棄物数量 (旧塗膜剥離後)	備考
剥離剤1回目	460m ²	512kg	1,050kg	一般部
剥離剤2回目	460m ²	512kg		一般部
剥離剤3回目	28m ²	192kg		添接部

表-11 ブラスト材産業廃棄物処理数量

Table 11 Volume of industrial waste by blast

作業内容	施工面積	使用数量	産業廃棄物数量 (ブラスト材使用后)
Case1,2,4	578m ²	19,250kg	21,760kg

5) その他

今回の素地調整試験で使用した機械設備を表-12 に示す。湿粒 (ミスト) ブラスト装置については、オープンブラストで使用する際には、水を供給せずに行った。また、各設備は、道路用地内の未供用地を利用して設置した (写真-15)。

表-12 素地調整試験機械設備

Table 12 Machines used for surface preparation test

名称	規格	台数	摘要
ミストブラスト	YBRN-2型	1台	オープンブラスト、湿粒ブラスト
パワーブラスター	ACV-OA型	1台	バキュームブラスト
空気圧縮機	PDS175SC	1台	
発動発電機	25kVA	1台	
発動発電機	2.5kVA	1台	
排気装置	200V(100m ³ /min)	1台	
動力工具(ディスクサンダー)	100V、960W	8台	
集塵機(乾湿両用)	100V、300W	1台	
投光器	LED(充電式)	2台	



写真-15 プラスト設備設置状況

Photo 15 Machines for blasting

地調整試験結果を反映させ、湿粒ブラストによる素地調整を行い、2017年3月に塗替塗装を完了している。今後は、5年ごとの橋梁点検により塗膜変状の有無を確認していくこととしている。

参考文献

- 1) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等塗装基準・同解説、pp.9-25、1980.3
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋塗装便覧、pp.114-120、1990.6
- 3) 本州四国連絡高速道路株式会社：保全管理要領 第2集 第2編 2-1塗替塗装、pp.21-23、2016.4
- 4) 日本道路協会：鋼道路橋防食便覧、pp. II -116- II -120、2014.3

7. まとめ

剥離剤によるエッチングプライマーの除去は難しく、その後の乾式工法では、作業環境の確保のため、能力の高い換気システムが必要となり、作業性も著しく劣ることを確認した。一方、湿粒ブラストは騒音に注意する必要があるが、今回の第六伊弉高架橋のように高架橋下が道路管理者の用地で周辺に民家が存在しない現場環境であれば、素地調整時の塗膜片や素地調整廃水の漏えい対策を施せば、湿式工法である湿粒ブラストにより素地調整が可能と判断できる。

また、一般的に課題とされている湿粒ブラスト後、数日間（今回は最大5日間）で発生する鋼材の戻りさびについては、仕上げ作業としてオープンブラストを行うことで全て除去可能であり、素地調整グレードも満足することを確認した。

8. おわりに

橋梁をはじめとする鋼構造物やコンクリート構造物、その他建築物に使用される塗料は、何種類もの天然物質や化学物質を原料として製造されており、その配合と使い方によっては、環境や人体に与える影響は大きい。現在は、有害物質を含む塗料の製造は中止されたり、代替製品の開発により対応されているが、過去に塗装され塗膜となっている物件に対する対応を適切に行っていく必要がある。

第六伊弉高架橋の残り 2,400m²については、今回の素

コンゴ民主共和国

Democratic Republic of the Congo

貴志 友基 Yuki Kishi

保全部 橋梁保全課長

藤田 憲二 Kenji Fujita

経営計画部 経営計画課長代理

1. はじめに

筆者らは、コンゴ民主共和国に日本の有償資金協力で1983年に建設されたマタディ橋の現況を調査する（独）国際協力機構（以下「JICA」という。）の調査団の一員として、2017年10月23日から11月2日にかけて同国を訪問する機会を得た。

マタディ橋はコンゴ川下流に架かる唯一の橋梁である。日本はマタディ橋を管理するバナナ・キンシャサ交通公団（以下「OEBK」という。）に対し、吊橋の維持管理に関する無償資金協力や技術協力を継続的に実施してきており、本州四国連絡高速道路（株）も協力の一端を担ってきた¹⁾²⁾。

本稿では、今回の調査で確認してきた供用後34年を経過したマタディ橋を中心に、コンゴ民主共和国の現況を報告する。

2. コンゴ民主共和国の概要

コンゴ民主共和国は、中部アフリカに位置する国で、西にわずかながら大西洋に面する内陸国で、9か国と国境を接している。国土はアフリカ大陸中央部のコンゴ川流域に広がり、アルジェリアに次いでアフリカ大陸で2番目の面積を擁し、世界全体でも11番目の面積を擁する日本の約6倍もある広大な国家である。

人口は約8千万人で、熱帯性気候であり国土の大部分は熱帯雨林で乾期と雨期があり、赤道直下のため年間を通じて気温の変化が少ない気候である。

豊富な天然資源に恵まれている世界トップクラスの鉱産資源国であり、輸出の約9割を鉱産資源が占めている。しかし、一部の鉱物は反政府武装組織の資金源となる紛争鉱物であり、国内が不安定化する要因のひとつとなっている。そのため、長年の内戦などでインフラが破壊され、経済は壊滅状態となっており、世界最貧国のひとつとなっている。



図-1 コンゴ民主共和国位置図

Fig.1 Democratic Republic of the Congo



図-2 マタディ位置図

Fig.2 Matadi

3. マタディ橋の概要

マタディ橋は円借款によりコンゴ川下流のマタディ市に架けられた橋梁である。橋長722m、中央径間長520mの3径間連続補剛トラス吊橋で、道路・鉄道併用橋として1979年に着工し、1983年に完成している。路面を支える床版は、鋼床版構造となっている。現在、鉄道は未完成で、アプローチ道路も含めて有料道路としてOEBKにより管理されている。



写真-1 マタディ橋全景（上流より）
Photo 1 Matadi Bridge (From upstream)

4. マタディ橋の現況調査

今回の調査は、マタディ橋及びそのアプローチ道路の舗装と橋梁設備全般を対象としており、OEBK技術者等へのヒアリングを実施し、課題等の抽出や情報収集を行うことを目的とした。

4.1 維持管理中期計画のフォローアップ

2014年に更新された維持管理中期計画²⁾について、OEBK側と2016年までの実施状況及び2017年以降の実施計画についてフォローアップを行った。その結果、予算に制約があり実施計画に追い付いていない印象を受けた。現在は優先順位の高い主ケーブル補修を実施している状況であり、舗装をはじめその他の補修までは実行されていない。

4.2 舗装調査

マタディ橋上およびアプローチ道路の舗装の現況について、主に目視、ロードメジャー等を使用しての変状（ひび割れ等）測定を実施した。調査結果の概要は以下のとおりである。

(1)マタディ橋

車道（2車線）が幅員8.5m、その両側に縁石（幅0.25m）をはさみ、歩道（片側につき、幅1.5m）の総幅員12.0mの幅員構成となっており、車線分離は中央帯に路面標示（白線）が引かれているのみで、路肩部分の明示（路側帯）はない。

変状については、既に30年以上経過しており、全体に表層アスファルトの劣化を確認できた（写真-2）。また部分的に亀甲状のひび割れ、わだちの発生等が見られた（写真-3）。



写真-2 表層アスファルトの劣化
Photo 2 Degradation of surface layer asphalt

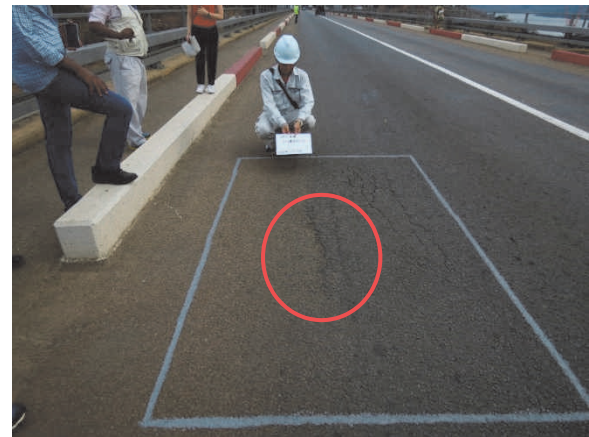


写真-3 ひび割れ確認
Photo 3 Crack check

ひび割れ発生位置は、主に走行軌跡部から発生、拡大している。主な原因は大型車交通の走行、混合物の経年劣化・老化と推測される。ひび割れは、混合物の劣化・老化に起因するものと、構造に起因するものに大別されるが、いずれも耐久性に影響を及ぼし、放置するとひび割れの拡大・進行、雨水の浸入によって変状が促進され、構造的損傷にいたる恐れがあるので注意が必要である。

特に、鋼床版構造ということもあり、早めの処置が必要と思われる。これらの変状を裏付けるように、写真-4に示す鋼床版裏面の添接ボルトの腐食箇所と、舗装面の変状箇所が同一なことも確認した。



写真-4 鋼床版添接ボルトの腐食
Photo 4 Corrosion of steel slab injection bolt

(2)右岸側アプローチ道路

右岸側アプローチ道路は、マタディ橋からボマ方面にむけて、全長約 6km である。舗装構成は、粒状路盤 20cm、表層 5cm で OEBK が維持管理を行っているものの、供用後大規模な補修は行われていない状態である。

交通荷重の集中、経年劣化、排水系統の不具合等から粒状路盤が掘り起こされ、路面が隆起、流動している変状も確認した（写真-5）。通行車両が少ないため、変状箇所を避けて車両は通過しているが、放置しておけば変状拡大にもつながるため、早期に対策が必要である。



写真-5 路面の隆起、流動した状況
Photo 5 Situation of road rise and flow

(3)左岸側アプローチ道路

左岸側アプローチ道路は全長約2kmで、マタディ橋開通を機に港を中心とする旧マタディ市街から、西に向かって延びてきた新市街の中心に位置するロータリー（国道1号線との接点）までである。右岸側と比較して、交通量が多く慢性的に渋滞が発生している（写真-6）。



写真-6 慢性的な渋滞状況
Photo 6 Chronic congestion

なお、交通量が多いにも関わらず、舗装の状態は右岸側に比べれば良好であった。路肩に設置された側溝も変状はなく、一定の役割は果たしている。しかしながら、一部箇所において、交通集中による平坦性の低下、ポットホール等の変状が発生している（写真-7）。

4.3 マタディ橋構造物等の調査

今回の調査時期が雨期となり、天候が悪い日が多く、



写真-7 平坦性の低下
Photo 7 Decrease of flatness

主塔の塔頂部などの高所で詳しく調査することができなかった。今回実施した調査状況は以下のとおりである。

(1)アンカレイジ上屋床版

吊橋の主ケーブルを支えるアンカレイジは、スプレー室と呼ばれる主ケーブルを定着するスペースがあり、上部はアンカレイジ上屋の床版となっている。アンカレイジ上屋の床版については、漏水が原因であるエフロレンスが多数確認されている。右岸側にある2Aアンカレイジ上流側では、過去に主ケーブル上に漏水する変状が発生し、OEBKにおいてシートによる防水対策を実施していた。2017年3月に完工した「マタディ橋保全計画」において、アンカレイジスプレー室内の除湿を実施し、あわせて写真-8に示すとおり主ケーブルへの漏水が確認された2Aアンカレイジ上流側のみ防水工を施工している。

今回の調査の結果、漏水箇所数の大小はあるが、全てのアンカレイジで防水工を施工する必要がある。



写真-8 防水工の状況(2A上流側)
Photo 8 Status of waterproofing workers (2A upstream side)

(2)マタディ橋付属設備調査

マタディ橋の補剛桁の付属設備である、上部作業車・下部作業車の現況を調査した。

これらの作業車には搭乗口が設置されておらず、写真-9に示すとおり既存の管理用通路から乗り込む場合は

手すりを跨ぐ必要があり、安全性に課題がある。このため、搭乗口を追加するなど、作業車および管理用通路の改造が望まれる。



写真-9 作業車への乗り込み状況
Photo 9 Status of getting on to the work vehicle

(3) マタディ橋ケーブル送気乾燥システム調査

事前に確認したケーブル送気乾燥システムのモニタリングデータから主塔塔頂部の湿度が高い状況が確認されていたが、今回の調査時期が雨期のため、天候の都合で現地状況を直接確認することができなかった。OEBKに最新のモニタリングデータを確認したところ、過去のデータと変化がなかったことから、今後高湿度箇所に対する詳細な調査の実施が望まれる。

ケーブル送気乾燥システムの稼働状況については、停電の影響でおおむね50%程度であることを確認した。調査期間中においても、複数回停電が発生しており、電力供給が安定していない状態であった。システムの再稼働は現地でブレーカー解除の上、起動スイッチを押す必要があるが、夜間や休日に停電が発生した場合は、再稼働が遅れる問題が生じている。これについては、24時間収受業務を行っている料金所に起動スイッチを設置するなど工夫が必要と考える。

5. コンゴ民主共和国での生活

コンゴ民主共和国の治安状況は近年安定傾向にあったが、現在「大統領退陣デモ」が活発化し、悪化傾向にある。訪問時もデモ開催の情報などもあったが、身の危険を感じることはなかった。しかし、行動は日中でも制約を受け、行動範囲もホテルや訪問先、マタディ橋現場等に限られ、必ず車での移動となる。

首都キンシャサからマタディまでは、幹線道路である国道1号線を車で移動した。国道1号線は写真-10のように舗装された道路であるが、路面表示はなく途中の市街地では速度抑制用のバンプ(段差)があり、また安全面から日中のみの走行に限られることや、複数の車で集団移動する必要があるなど、厳しい行程になった。

食事もホテルやレストランなどでとることとなるが、衛生上や治安上から限られた場所になり、メニューの選

択肢も限られる。



写真-10 国道1号線
Photo 10 National route 1

6. おわりに

今回、JICAの調査団の一員として、コンゴ民主共和国に訪問し、マタディ橋の現地調査に参加する貴重な機会を得ることができた。調査したマタディ橋は完成後34年が経過していたが、比較的良好な状態を保っている。これもOEBK職員の努力と勤勉さによるものと、改めて感謝の念を表したい。

ところで今回調査した舗装については、OEBKも補修などの技術的な知見や経験もなく、またマタディにはアスファルト製造プラントもないなど、現地で補修を進めるには厳しい状況であることが確認できた。また、昨年度新たに日本の援助で設置されたケーブル送気乾燥システムについても、電力事情が厳しい条件などもあり、引き続きフォローアップが必要であると考えられる。

マタディ橋はコンゴ民主共和国にとって極めて重要な社会資本であり、日本との友好にも大変寄与するものである。今後も本州四国連絡橋と同じく200年以上にわたり利用される橋をめぐっていただくためにも、OEBKのみなさんの熱心な取組に大いに期待しているところであり、そのための協力を今後も引き続き行わなければならないと考えている。

なお、最後になりましたが、今回の調査にあたりいろいろご支援を頂いた、JICA本部、JICAコンゴ民主共和国事務所、OEBKのみなさんをはじめ、これまでマタディ橋に関係された多くの方々に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 荻原 勝也：海外報告(コンゴ マタディ橋の現況)、本四技報、Vol.35、No.115、pp.27-30、20109
- 2) 竹内 政彦：マタディ橋維持管理能力向上プロジェクト、本四技報、Vol.38、No.121、pp.24-28、20149

神戸淡路鳴門自動車道 淡路島中央スマートインターチェンジ供用開始

Opening of Awajishima-Chuo Smart IC on Kobe-Awaji-Naruto Expressway

2018年2月17日、神戸淡路鳴門自動車道の津名一宮ICと洲本IC間に建設中の淡路島中央スマートインターチェンジ（以下「SIC」という。）が供用開始しました。

SICは、以下の効果が期待されています。

- ・高速道路の利用時間短縮による利便性向上（神戸-洲本市中心部が約5分短縮）
- ・淡路島北部地域から兵庫県立淡路医療センターへのアクセスの改善による救急搬送の充実
- ・災害時の緊急輸送路ネットワークの機能向上
- ・沿岸部の主要観光地へのアクセスの改善による観光利便性の向上
- ・アクセスの改善による中川原、五色地域等への企業誘致

SIC関連工事の特徴について、ご紹介します。

(1)土工工事

- ◆上り線側及び土取場（摺井谷）からの土運搬が約82万m³あり、周辺への環境に配慮し施工しました。
- ◆用排水の付替等により、コルゲートパイプを6箇所207m（ポリエチレン管含む）を土工と並行し施工しました。

(2)舗装工事

- ◆加減速車線部分の施工に伴い、道路利用者並びに作業員の安全確保及び施工期間の短縮を図るため、固定規制による昼夜連続規制を上下線で行いました。道路利用者や作業員が負傷するなどの大きな交通事故もなく163日間で作業を終えることができました。
- ◆SIC事業の最終年となる平成29年には、舗装・標識を始め、電気通信設備工事・ETC設備工事等が同時期に作業を行うことになりました。各工事担当者と監督員による調整会議を毎週実施し、各工事の施工や通行可能箇所の確認を行い、各工事が効率的に作業を行うことができるように調整を図りました。

(3)電気通信設備工事

効率的な電気通信設備とするため、以下の点に配慮しました。

- ◆建築設備について、近傍無線局及び既存伝送設備を活用し通信機械室を設けないこととしました。また、屋外型キュービクルを採用し、電気室を設けないこととしました。
- ◆ETC設備について、バックアップ機能及び将来遠隔料金所化を想定し、津名一宮ICに遠隔化設備を設置しました。



写真-1 上り線側 全景

	平成25年度	平成26年度	平成27年度	平成28年度	平成29年度
手続	6.11連結許可 6.28工事開始公告 7.24基本協定変更	12.22区域変更(当初)			4.4区画線設置協議 5.22名称決定 12.23一部完了検査申請 12.26区域変更(変更)
調査設計		市杭	設計		
工事			土工		舗装・標識 電気通信 ETC 営繕

図-1 事業工程

- ◆道路情報板について、料金所情報板（CL）に2事象表示機能を追加し、入口情報板（BL）を設けないこととしました。また、情報板の視認性を確保するため、ETC設備のガントリーに共架としました。



写真-2 入口情報板

最後に、本SICは民営化以降、初めてとなる改築工事でした。工事において、目的物を作るという基本的な考え方では、建設時代そして管理約30年の経験を活かすことができました。一方、諸手続は民営化により基本のスキームが変わっており、情報収集や関係機関との打合せを行いつつ、作業を行うことになりました。

引き続き、路肩部のコンクリートシール工等の残工事及び事業の実施に伴う設計の考え方と設計・施工に伴い発生した対応内容を取りまとめ、道路管理に引き継いでいきます。

（鳴門管理センター 工事課長 佐伯成巳）

第9回ニューヨーク市橋梁会議

9th New York City Bridge Conference

第9回ニューヨーク市橋梁会議（New York City Bridge Conference。以下「NYCBC」という。）が2017年8月20日～22日の日程で、アメリカのニューヨーク市で開催されました。NYCBCは、各国の橋梁技術者（管理者、設計者、研究者及び施工者）が、最先端の橋梁技術や橋梁建設について発表やディスカッションを行う場として、2001年からほぼ2年に一度の間隔で開催されています。

今年は4編の基調講演と88編の論文発表が二日間にわたって行われました。論文発表では建設技術、維持管理、疲労解析、耐震補強など幅広いセッションテーマが設けられており、各セッションテーマに沿った内容の発表が行われました。

本四高速からは「耐震解析及び地質設計」のセッションにおいて、長大橋技術センターの平山より「道路鉄道併用吊橋の耐震補強設計」について発表を行いました。発表内容は瀬戸大橋吊橋の耐震性能照査結果と耐震補強検討に関するものです。

また会議に先立って、スタディーツアーも行われました。本ツアーは、マンハッタン島周辺の主要な橋梁を船上より視察するもので、乗船中はニューヨーク市交通局より各橋梁の諸元や歴史について説明がありました。

会議の翌日には長大橋管理者ワークショップが行われ、長大橋を管理する8団体が参加し、各団体が取り組んでいる橋梁技術について情報交換が行われました。本四高速からは、長大橋技術センターの西谷グループリーダーより「Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂検出手法と補強方法の開発」と「瀬戸大橋の耐震補強」について発表を行いました。発表には多くの質問があり、本四高速の技術と取組をPRすることができました。

また、会議参加と併せて、ニュージャージー州とデラウェア州を結ぶデラウェア・メモリアル橋を管理するデラウェア河・港湾公団（Delaware River and Bay Authority。以下「DRBA」という。）とハドソン川に架かる有料橋梁5橋を維持管理するニューヨーク州橋梁公団（New York State Bridge Authority。以下「NYSBA」という。）を訪問しました。

DRBAを訪問した際には、デラウェア・メモリアル橋のケーブル送気システム工事とハンガーロープの交換工事を視察しました。DRBAでは2016年より大規模修繕工事を実施しており、ケーブル送気システムは2018年秋に導入完了される予定です。

NYSBAを訪問した際には、管理する橋梁のうち3橋を視察し、管理者より各橋梁の補修工事の履歴や維持管理における取組について説明を受けました。NYSBAは2017年9月にベア・マウンテン橋でケーブル開放調査を実施し、ケーブルワイヤー2本の破断と数本にさびの発生を確認しました。ミッド・ハドソン橋でも2018年に

ケーブル開放調査が実施される予定です。



写真-1 NYCBC 議長の Mahmoud 氏による開会挨拶



写真-2 平山の論文発表



写真-3 西谷グループリーダーの論文発表
（長大橋管理者ワークショップにて）



写真-4 デラウェア・メモリアル橋
（長大橋技術センター 総括・耐震グループ 平山靖之）

Eurosteel Copenhagen 2017（第8回鋼と複合構造に関する欧州会議）

Eurosteel Copenhagen 2017
(the 8th European Conference on Steel and Composite Structures)

Eurosteel Copenhagen 2017（第8回鋼と複合構造に関する欧州会議）が、2017年9月13日から15日までの3日間、デンマークの首都コペンハーゲンで開催されました。本会議は、鋼に関する様々な研究・設計・建設についての情報を幅広く提供・議論し、それらを通じて教育の改善を図ることを目的として、欧州の大学組織が主催している会議です。会議は1995年からおおむね3年おきに開催され、今回で8回目の開催となります。

今回の会議では、論文発表を主体に、基調講演やポスターセッション（写真-1）などが行われ、全体で45の国と地域から600名近くの方が参加しました。会議全体の内容は、Eurocode（設計基準）、材料、ボルト・溶接接合、鋼構造という基礎的な研究から、橋梁、マスト・タワー構造物、海上構造物、建築物と実務的な研究まで多岐にわたっています。本四高速からは今回が初参加となり、「Retrofitting Refurbishment & Sustainability」のカテゴリー内にて『A study on Repair Method Using Thread Rolling Screw for Fatigue Cracks in Orthotropic Steel Deck（TRSを用いた鋼床版疲労亀裂の補修方法の開発）』と題して、関西大学と共同で開発したUリブ鋼床版ビード貫通亀裂に対する鋼床版下面からのみで施工できる有効な補修方法の開発とその疲労試験結果について、保全部橋梁保全課の鎌田が発表いたしました（写真-2）。本論文に対し、座長から「興味を持って読ませていただいた。」というお褒めのコメントをいただきました。また、「TRSを締め込む際のボルト径と母材の削孔径とのクリアランスはどの程度か。」という質問があり、「TRSの径16mmに対して、削孔径は15.5mmとしている。」と回答しました。

また、本会議の参加に合わせ、オーレスン・リンク及びグレートベルト・リンクの事務所をそれぞれ訪問し、技術交流（情報交換及び現地調査）を行いました（写真-3、写真-4）。本四高速からは、いずれも200年以上の供用を目指したアセットマネジメントの取組について情報を提供しました。各事務所からは、組織・管理対象・料金制度の概要のほか、オーレスン・リンクでは今後計画しているトラス桁の塗替塗装に関する塗装仕様・施工足場等の検討状況、グレートベルト・リンクでは吊橋ハンガーロープ・コンクリート製主塔の近接点検手法や桁・ケーブル作業車に関する内容を主体に、それぞれ情報をいただきました。

（保全部 橋梁保全課 鎌田将史）



写真-1 ポスターセッションの様子



写真-2 本四高速の発表



写真-3 オーレスン橋（左奥に斜張橋部）



写真-4 グレートベルト・リンク（東橋塔頂より）

第39回IABSEシンポジウム（カナダ）

39th IABSE symposium, Canada

第 39 回 IABSE（国際構造工学会）シンポジウムが 2017 年 9 月 21 日から 23 日までの 3 日間、カナダのバンクーバーで開催されました。IABSE（International Association for Bridge and Structural Engineering）はスイス民法（Swiss Civil Law）により 1929 年に設立された土木と建築を包含する、この分野では最も長い歴史と伝統をもつ学会組織であり、現在世界の 100 カ国以上の国から 4000 人を超える会員（個人・法人）が加入しています。本部は、スイスのチューリッヒにあり、各国にはナショナルグループ（National Groups）が置かれています。日本グループの事務局は、一般社団法人日本鋼構造協会が担当しています。

今回のシンポジウムでは、開会式（写真-1）とそれに続く基調講演の後、口頭発表が行われました。発表論文は、「Innovations in Structures（構造革新）」「Existing Structures into the Future（現存する構造物の将来）」「Performance Based Design（性能設計）」の3つの大テーマを基に論文募集が行われ、査読を経て 465 編の論文が選ばれ、口頭発表論文とポスター発表論文が決定されました。本四高速からは、「Fatigue inspection for orthotropic steel deck with infrared thermography（赤外線サーモグラフィを用いた鋼床版の疲労点検）」と題して、赤外線サーモグラフィを用いて U リブ鋼床版のデッキプレートと U リブの溶接ルート部から発生し、ビード表面に向かって進展するビード貫通亀裂を検出する技術について、長大橋技術センター診断・構造グループの奥村が口頭発表を行いました（写真-2）。この発表に関しては、多くの方に興味を持って頂くことができ、発表後には、「他の箇所でも適用は可能なのか」「どのくらい短いサイズの亀裂を検出することができるのか」など、多くの質問を受けました。

また、シンポジウムの最終日に開催されたテクニカルツアーでは、バンクーバー港からのナイトクルーズが行われ、夜のライオンズゲート橋などの橋を下から観賞したり、夜のバンクーバーの町並みを観賞したりしました（写真-3）。

また、シンポジウムに参加した後、アメリカのサンフランシスコへ移動し、ゴールデンゲート橋（写真-4）の管理会社である「Golden Gate Bridge, Highway and Transportation District（ゴールデンゲート橋・道路・交通管理局）」を訪問し、ゴールデンゲート橋の耐震補強や塗替え塗装の状況、自殺者対策に力を入れていることなど、維持管理の現状などについての聞き取り調査を行いました。



写真-1 開会式の様子

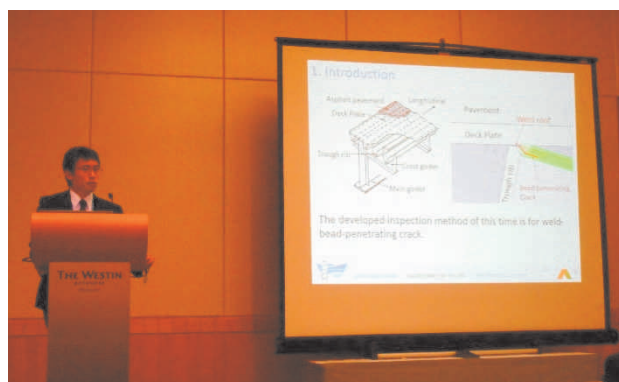


写真-2 本四高速の発表



写真-3 テクニカルツアー（ライオンズゲート橋）



写真-4 ゴールデンゲート橋
（長大橋技術センター 診断・構造グループ 奥村淳弘）

国際吊構造橋梁管理者会議 アジア地域ワークショップ開催（神戸）

ICSBOA Asia Regional Workshop in Kobe

国際吊構造橋梁管理者会議（ICSBOA; International Cable Supported Bridge Operators Association）のアジア地域ワークショップが2017年11月13日～14日の日程で、神戸で開催されました。同会議は、各国の長大橋管理者の間で維持管理に係る課題等について意見交換を行うこと、適切な維持管理の重要性を世界的に広めること等を目的に組織されているもので、世界の3つの地域（北米、アジア、欧州）を代表する常設メンバーによって運営されています。現在、常設メンバーは以下の6組織で、本四高速（株）はその一員として同会議に参画しており、これまでに2回の国際会議を主催しています（第3回会議（2002年5月、淡路島）及び第6回会議（2008年5月、高松））。

ICSBOAの常設メンバー（2018年3月現在）

北米：Halifax Harbour Bridges（カナダ）、MTA Bridges and Tunnels（米国）

アジア：本四高速（株）、Jiangsu Communications Holdings（中国）

欧州：Sund & Belt Holding A/S（デンマーク）、Tamar Bridge（英国）

また、国際会議の他、管理者間での意見交換、同会議の運営方針などの意見調整を行うことを目的に、おおむね年に1回の頻度でワークショップが開催されており、今回、アジア地域でのワークショップが本四高速（株）の主催で神戸にて開催されました。香港及び韓国の長大橋の管理に関わる技術者を迎え、主に下記の内容について、各機関からのプレゼンテーション及び活発な意見交換が行われました。

- ・斜張橋ケーブルのモニタリング
- ・既設吊橋の耐風安定性の再評価
- ・吊橋ハンガーロープの塗替え
- ・既設鋼桁橋の防食工法

今年の10月には、第10回目となる国際会議が中国・江蘇省で開催される予定です。



（企画部 企画課長代理 遠山直樹）

IRF世界道路会議（WRM2017）の開催

IRF 18th World Road Meeting 2017

2017年11月14日～17日の日程で国際道路連盟（International Road Federation：IRF）主催の世界道路会議（18th World Road Meeting 2017）がインドのデリーで開催されました。

国際道路連盟は安全かつ持続可能な道路及び道路ネットワークの開発や維持管理についての道路工学関連の専門技術の推進、情報の共有、技術の発展を目的として1948年に設立されています。

今回の会議は、Safe Roads and Smart Mobility: The Engines of Economic Growthをテーマとして、4つの全体会議に引き続き、8テーマに別れて合計136の論文発表、ポスターセッション及び展示会が行われました。

本四高速からは長大橋技術センター防食・耐風グループ竹口と神戸管理センター橋梁維持課信重の2名が参加し、「厳しい腐食環境に位置する橋梁の塗装維持管理戦略（Maintenance strategy of coating system for bridges located in severe corrosive environment）」と題して、本四高速全体の塗装の維持管理方針について論文発表を行いました。

なお、慢性的な道路渋滞が問題となっているデリー周辺では、道路や鉄道の整備が鋭意行われています。このうち、デリー郊外のヤムナ川で架設中のSignature bridge（全長675m、最大支間長251mの斜張橋）を自主調査しました。



写真-1 プレゼン状況



写真-2 Signature Bridge（建設状況）

（神戸管理センター 橋梁維持課 信重和紀）

第9回アジア太平洋風工学会議

The 9th Asia-Pacific Conference on Wind Engineering (APCWE)

第9回アジア太平洋風工学会議（Asia-Pacific Conference on Wind Engineering. 以下「APCWE」という。）が、2017年12月4日～7日の日程で、ニュージーランドのオークランド市で開催されました。APCWEは、世界風工学協会（International Association for Wind Engineering, IAWE）の主催する世界風工学会議（International Conference on Wind Engineering, ICWE）の地域ごとの会議（その他に、ヨーロッパ・アフリカ地区（EACWE）、アメリカ地区（ACWE）がある）の一つです。1985年に第1回会議がルークリー（インド）で開催され、その後、4年ごとに開催されており今回が9回目の開催となります。

今回の会議は7つの基調講演と198の一般論文発表で構成されており、一般論文は分野ごとにセッションに分類され、最大5つの会場で平行して発表が行われました。

最大のセッションは「橋梁の風工学」であり、類似の「ケーブルと橋梁」とあわせると33編の論文が発表されました。この33編のうち、21編は中国からの発表であり、現在長大橋支間長のランキングの上位に多くの橋梁を有する同国の実状を反映する形となっていました。中国の21編のうち、次回APCWEを主催する西南交通大学が9編、基調講演も行った葛（Ge）教授の在籍する同済大学が4編を占めていました。その他として日本から6編、ヨーロッパから5編、その他のアジア（タイ）から1編の発表がありました。これら33編のうち、橋梁のフラッターに関するものが9編、ガスト応答に関するものが6編、渦励振に関するものが5編でした。特に長大二箱桁吊橋では渦励振が問題になるケースが多いようで、それに関する研究発表もありました。

本四高速からは、長大橋技術センター防食・耐風グループサブリーダーの花井が「30年供用した吊橋の耐風性再評価」と題して、瀬戸大橋三吊橋の中央分離帯グレーチング閉塞について実験と解析により検討した結果の発表を行いました（写真-1）。



写真-1 発表状況

（長大橋技術センター
防食・耐風グループサブリーダー 花井拓）

日本道路会議優秀論文賞受賞

HSBE member won an award in Japan Road Conference

2017年10月31日（火）～11月1日（水）に東京都の都市センターホテルにて開催された「第32回日本道路会議」において、当社から建設・施工技術（橋梁）部門で発表した「赤外線サーモグラフィによる橋梁維持管理の高度化（長大橋技術センター 診断・構造グループ 奥村淳弘）」が、優秀論文賞を受賞しました。

本会議は、日本道路協会の主催で昭和27年から隔年で開催されています。発表は、口頭発表とポスターセッションの形式に分かれ、口頭発表は、計画・環境・安全・情報・マネジメント、道路管理・修繕・更新及び建設・施工技術の各部門が設けられ、更に建設・施工技術は、舗装、土工、橋梁、トンネルに分類され、計6部門が設けられ、国、地方公共団体、高速道路関係各社のほか民間会社などから総数445編の発表があり、論文内容の独創性、有益性、信頼度、完成度、発表及び質疑応答を勘案した審査の結果、口頭発表では29編の優秀論文が選定されました。

受賞した論文は、本四高速、神戸大学と滋賀県立大学で共同開発を進めている橋梁の維持管理技術で、赤外線サーモグラフィを用いて鋼材の表面の温度を計測することにより、鋼床版の溶接部における亀裂を非破壊で効率よく高精度に検出することができる技術です（特許6052737）。

なお、本技術に関しては、建設技術展2015近畿に「赤外線サーモグラフィによる鋼床版の亀裂検出」として出展し、本四高速では初の「審査委員特別賞」を受賞しました。また「平成28年度国土交通省 国土技術研究会」において、「赤外線サーモグラフィによる維持管理技術高度化に関する技術開発の現況と今後（長大橋技術センター 診断・構造グループ 溝上善昭）」が、「優秀賞」として表彰されました。

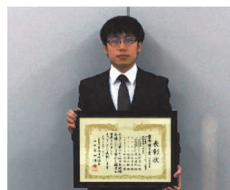


写真-1 奥村淳弘氏

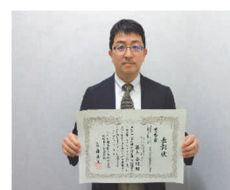


写真-2 溝上善昭氏

（企画部 調査情報課長代理 寺嶋賢策）

国土技術研究会自由課題優秀賞受賞

HSBE member won an award in MLIT Technical Conference

2017年11月13日(月)～14日(火)に国土交通省にて開催された「平成29年度 国土交通省 国土技術研究会」において、当社代表として自由課題/イノベーション部門で発表した「トンネル LED 照明の適正な清掃頻度の検討(神戸管理センター 電気通信課長代理 日高英治)」が、優秀賞を受賞しました。

本研究会は、内務省直轄技術研究会として昭和22年に初開催された後、毎年開催され今年で71回目の開催を迎えました。発表課題は、指定課題と自由課題に区分され、更に自由課題は、一般(安全・安心)、一般(活力)、イノベーション、アカウンタビリティの各部門が設けられ、本省、地方整備局、高速道路会社、試験研究機関等から発表がありました。

本四高速では、毎年、社内の技術発表会の優秀論文から代表論文1編を選考応募しています。今回応募したイノベーション部門では、総数22編の発表があり、論文、プレゼンテーションなど総合評価の結果、最優秀賞2編、優秀賞4編が表彰されました。



写真-1 日高英治氏=後列左から3人目

受賞した本編は、他機関の先駆けとなるテーマであり、従前は、トンネルの照明灯具の清掃は、ランプ交換作業にあわせて行っていたものを、LED照明への更新に伴いランプ寿命が延びたことから、舞子トンネルを例に排ガス等による照明灯具の汚損に伴う路面輝度の低下を調査し、トンネルの照明灯具の適正な清掃頻度について検討した内容です。

(企画部 調査情報課長代理 寺嶋賢策)

瀬戸大橋が日本の20世紀遺産に選定

Seto-Ohashi Bridges were selected as one of Top 20 of Twentieth-century heritages in Japan

2017年12月8日、日本イコモス国内委員会より「日本の20世紀遺産20選」の選定発表があり、その1つに瀬戸大橋が選定されました。

イコモス(ICOMOS/国際記念物遺跡会議、International Council on Monuments and Sites)は文化遺産に関わる課題等について取り組む有識者の機関で、ユネスコ世界文化遺産に関する諮問機関です。日本イコモス国内委員会報道発表資料等によりますと、各国より20世紀遺産20選を選定することとなり2013年より議論をしていたところ、瀬戸大橋は吊橋技術のシンボルであるとともに、道路と鉄道両方を通すため伸縮装置などに技術的工夫が凝らされており、とりわけ北備讃瀬戸大橋と南備讃瀬戸大橋が技術的挑戦が顕著であるということで両吊橋が20世紀遺産の構成資産として選定されました。

選定された北備讃瀬戸大橋と南備讃瀬戸大橋は、それぞれ中央支間長990m、1100mの共用アンカレイジを有する世界最大級の道路鉄道併用の吊橋です。1988年4月10日にこれらを含む一連のルートが供用し、2018年4月10日に開通30周年を迎えることとなりました。

南・北備讃瀬戸大橋の建設にあたっての技術的挑戦として、道路鉄道併用橋として重量の大きい列車走行による繰り返し作用を考慮した疲労設計法の開発、柔軟な構造を有する長大吊橋に高速鉄道を走行させるための特殊な軌道伸縮装置の開発、設置ケーソン工法を用いて大水深・強潮流下に海中基礎を安全・確実に構築する技術、当時世界最大の直径1070mmの主ケーブルを短期間に架設する技術、航路を塞ぐことなく橋桁を架設する技術等が挙げられます。

これらの技術により完成した瀬戸大橋が20世紀遺産に選定された事は、大変光栄なことと考えております。

本州四国連絡高速道路株式会社は、選定された瀬戸大橋をはじめとする本州四国連絡橋を、お客様が安全・安心・快適に200年以上の長きにわたりご利用いただけるよう、今後とも万全な維持管理に努めてまいります。



写真-1 北備讃瀬戸大橋(左)と南備讃瀬戸大橋(右)

(東京事務所 技術調整課長代理 池田秀継)

文 献 紹 介

本州四国連絡橋関連技術文献紹介 (17.08~18.01)

題 名	著 者	雑誌名等	巻 号	年 月	頁
多々羅大橋～国内最長の長大斜張橋	平原伸幸	JSSC 2015 WINTER No. 20		201501	5
本四高速道路の利用に伴う経済効果—仮説的抽出法による計測—	濱田禎 下元俊英 前島一陸 遠香尚史	土木計画学研究発表 会・講演集	54	201611	15
明石海峡大橋のインフラツーリズムに関する取組 12年間で約10万人が参加、長大橋梁の建設・管理 技術の理解に貢献	臼田幸生	道路 2017.02		201702	5
地域間産業連関表を用いた本四高速道路の経済効 果計測～特に第3次産業分の取り扱いについて～	濱田禎 下元俊英 前島一陸 遠香尚史	土木計画学研究発表 会・講演集	55	201706	13
Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂に対する下面補修工 法の提案	溝上善昭 森山彰 小林義弘 坂野昌弘	土木学会論文集			18
道路鉄道併用吊橋における耐震設計(Seismic Retrofit Design of Highway-Railway Combined Suspension Bridges)	西谷雅弘 河藤千尋 平山靖 之	9th New York City Bridge Conference		201708	11
200年以上にわたり利用される橋の実現を目指す 本州四国連絡橋	大谷康史	橋梁と基礎	51 11	201708	4
高速道路補修工事における映像利用の効果につい て	西山周 黒河洋吾 井上孝一 島田弘次 山本和弘 須田 清隆 建山和由	土木学会全国大会 第72回年次学術講演 会		201709	2
シラン系表面含浸材をASR劣化が進行したコンク リートに塗布した際の劣化抑制効果と水分逸散性 能に関する検討	谷河雅大 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72回年次学術講演 会		201709	2
明石海峡大橋洗掘確認調査	信重和紀 麓興一郎 小川和 也 堤仁志	土木学会全国大会 第72回年次学術講演 会		201709	2
瀬戸大橋海中基礎の劣化度調査	安部真理子 門田整達 遠藤 和男	土木学会全国大会 第72回年次学術講演 会		201709	2
熱弾性応力分布計測結果の破壊力学評価による鋼 構造部材の疲労き裂進展性評価	阪上隆英 溝上善昭 奥村淳 弘 塩澤大輝 藤本泰成 東智 之 和泉遊以	土木学会全国大会 第72回年次学術講演 会		201709	2
熱弾性応力分布計測結果の破壊力学評価による鋼 橋の疲労き裂補修効果の検証	東智之 溝上善昭 中山和真 阪上隆英 塩澤大輝 藤本泰 成 和泉遊以	土木学会全国大会 第72回年次学術講演 会		201709	2
トラス部材の疲労に着目した管理手法に関する検 討	奥村淳弘 溝上善昭 安部真 理子 大隅俊陽 香川耀平 中 山和真	土木学会全国大会 第72回年次学術講演 会		201709	2

題 名	著 者	雑誌名等	卷 号	年 月	頁
太径ねじ部材の疲労強度	河野慎也 小河正次 溝上善昭 奥村淳弘 坂野昌弘	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
暴露期間10年以上が経過したFRP材料の力学特性	町田陽 楠原栄樹 花井拓山根彰	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
瀬戸大橋吊橋の耐震補強	平山靖之 河藤千尋 花井拓	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
道路鉄道併用トラス橋の免震化対策	花井拓 河藤千尋 平山靖之	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
オープングレーチングを閉塞したトラス補剛桁吊橋の耐風安定性向上の検討	小寺拓実 勝地弘 山田均 楠原栄樹	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
下津井瀬戸大橋の耐風安定性に関する一考察	楠原栄樹 山根彰 花井拓 町田陽	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
明石海峡大橋ハンガーロープ定着部開放調査	麓興一郎 信重和紀 堤仁志 小川和也	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
神戸淡路鳴門自動車道の高盛土の常時・降雨時・地震時の作用に対する性能照査	角野充 村上博基 横井芳輝 常田賢一	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
銅スラグを適用したコンクリートの乾燥収縮特性及び物質移動抵抗性に関する検討	西山航平 渡邊健 福富隼人 橋本親典	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
2016年熊本地震の観測波を用いた橋台衝突実験	岩坪要 別城小百合 山岸千夏	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
酸素を遮断して腐食を防止する窒息(チョーク)工法に関する実証実験とその実用化	安江哲 齊藤清美 伊川辰茂 次村英毅 麓興一郎	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
上塗り剥離要因に関する実橋塗膜調査結果	久米昌夫 楠原栄樹 町田陽	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
33年経過したオープングレーチングの溶融亜鉛めっき劣化度評価の考察	井上晃祐 森脇正生	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2
塩害環境の厳しいRC中空床版裏面コンクリートの補修工法検討	新野貴大 貴志友基 長尾幸雄	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会		201709	2

題 名	著 者	雑誌名等	卷	号	年月	頁
PC高架橋の漏水経路調査の実施報告	麓興一郎 信重和紀 江口敬一	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会			201709	2
音響探査法を用いたコンクリート表層欠陥探査技術の開発—長距離計測に関する検討(II)—	上地樹 杉本恒美 杉本和子 川上明彦 歌川紀之	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会			201709	2
蛍光X線分析計を用いたコンクリート表面塩分調査	堤仁志 麓興一郎 小川和也	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会			201709	2
赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ計測による亀裂検出の高度化	溝上善昭 森山彰 奥村淳弘 大藤時秀 和泉遊以 阪上隆英	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会			201709	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	上西広幹 和泉遊以 阪上隆英 溝上善昭 森山彰	土木学会全国大会 第72回年次学術講演会			201709	2
塗装実績を基にした高耐久性ふっ素樹脂塗料の長期耐久性	竹口昌弘	Structure Painting 2017	45		201709	5
本州四国連絡橋因島大橋ハンガーロープ塗替え塗装	山根彰 藤澤幸廣	高速道路と自動車	60	09	201709	4
神戸淡路鳴門自動車道における高盛土の性能評価	角野充 村上博基 石井一知 常田賢一	第32回日本道路会議 論文集			201709	2
暴露期間10年が経過したFRP材料の力学特性	町田陽 楠原栄樹 花井拓 山根彰	第32回日本道路会議 論文集			201709	2
本四高速道路の経済効果—地域間産業連関表による計測—	下元俊英 前島一陸 濱田禎 遠香尚史	第32回日本道路会議 論文集			201709	2
HTB加熱による軸力調査	信重和紀 麓興一郎 堤仁志	第32回日本道路会議 論文集			201710	2
赤外線サーモグラフィによる橋梁維持管理の高度化	奥村淳弘 溝上善昭 阪上隆英 塩澤大輝 和泉遊以	第32回日本道路会議 論文集			201710	2
Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂に対するTRSを用いた下面補修法の開発	溝上善昭 金澤高宏 坂野昌弘	高速道路と自動車	60	10	201710	5
200年供用を支える吊橋ケーブル送気乾燥システム	貴志友基 朝倉義博	橋梁と基礎	51	11	201711	4
本州四国連絡橋における長大橋点検補修用作業車の変遷と改善に向けた取り組み	敷地直城 松尾俊宏 大浦義司	高速道路と自動車	60	12	201712	4

※本四技報，技術発表会は除外。

本四技報総目次(No. 1 ~No. 130)

題 名	執 筆 者	号	年月
■巻頭言			
発刊にあたって	尾之内由紀夫	No.1	1977. 7
発刊にあたって	蓑輪健二郎	No.1	1977. 7
本四技報の充実発展を願って	井上義光	No.2	1977. 10
「悪くても」と「うまくゆけば」	川崎偉志夫	No.3	1978. 1
技術雑感	浅間敏雄	No.4	1978. 3
技術感想	松崎彬磨	No.5	1978. 7
工事と安全技術	多田安夫	No.6	1978. 10
カレンダーによせて	山本成美	No.7	1979. 1
豊かさは自らの心の中にある	平石茂義	No.8	1979. 4
或る連想—大三島橋の開通式に出席して	富樫勘七	No.9	1979. 7
再び船上会談を	大富 宏	No.10	1979. 10
大三島橋のしゅん功にあやかって	久保村圭助	No.11	1980. 1
ある橋の話	浅谷輝雄	No.12	1980. 4
新しい芽を育てよう	尾之内由紀夫	No.13	1980. 7
文科と橋	向井 清	No.14	1980. 10
橋の建設と維持	下川浩資	No.15	1981. 1
本州四国連絡橋を考える	山根 孟	No.16	1981. 4
Seeing「見ること」	松崎彬磨	No.17	1981. 7
美観・安全性・経済性	大島 久	No.18	1981. 10
基礎とその認識	吉田 巖	No.19	1982. 1
新しい技術と経験	沖中浩一郎	No.20	1982. 4
経験について—森有正の思想をかりて	山本成美	No.21	1982. 7
荒廃するアメリカの躍動	山根 孟	No.22	1982. 10
新しいものへの挑戦	高橋弘篤	No.23	1983. 1
人口をめぐって	柴田啓次	No.24	1983. 4
土木工事雑感	高山 昭	No.25	1983. 7
文科と理科	柴田啓次	No.26	1983. 10
新たなる目標	松崎彬磨	No.27	1984. 1
現場からの土産話	吉田 巖	No.28	1984. 4
因島大橋雑感	大橋昭光	No.29	1984. 6
地域開発橋	高橋信夫	No.30	1984. 7
窓外雑感(みなと・神戸)	今中靖雄	No.31	1984. 10
本州四国連絡橋事業を支える技術	山根 孟	No.32	1985. 1
技術と人間あれこれ	山下文利	No.33	1985. 4
技術開発に思うこと	林 宣熙	No.34	1985. 7
明石海峡大橋への課題	大橋昭光	No.35	1985. 10
大鳴門橋建設をふりかえって	今中靖雄	No.36	1985. 12
大鳴門橋と関連区間の開通	奈良平竣彦	No.36	1985. 12
大鳴門橋と関連区間の開通	松本弘輝	No.36	1985. 12
大鳴門橋に関する二、三の思い出	小川英信	No.36	1985. 12
明石への道	高橋弘篤	No.37	1986. 1
トップランナーの努め	吉田 巖	No.38	1986. 4

道路の管理について	高橋信夫	No.39	1986. 7
「明石」の事業再開にあたって	遠藤武夫	No.40	1986. 10
最善の努力を結集しよう	山根 孟	No.41	1987. 1
技術力の向上	深田彰一	No.42	1987. 4
視点	花市穎悟	No.43	1987. 7
開通6ヶ月前	松崎 実	No.44	1987. 10
道路整備こそ国家繁栄への道	加瀬正蔵	No.45	1988. 1
伯方・大島大橋の開通によせて	花市穎悟	No.46	1988. 4
伯方・大島大橋の開通	小川英信	No.46	1988. 4
技術に謙虚さを	萩原 浩	No.47	1988. 7
「器用人」と技術者	吉住俊彦	No.48	1988. 10
アメリカズカップ	岡田哲夫	No.49	1989. 1
「技術」雑感	平井 清	No.50	1989. 4
着工一年	森本隆也	No.51	1989. 7
道	永井 滋	No.52	1989. 10
本四架橋技術の今後の課題	遠藤武夫	No.53	1990. 1
沙弥島の風景	石山四郎	No.54	1990. 4
本四公団の三つの目的	中平一郎	No.55	1990. 7
天の浮橋、その過去と現在	木村敬宇	No.56	1990. 10
多々羅大橋の起工式を迎えて	旭 一穂	No.57	1991. 1
「豊かさの感じられる社会」の実現のために	高田雅夫	No.58	1991. 4
超長大吊橋と風	飯島武明	No.59	1991. 7
「共生・協調」の重視へ	杉岡 浩	No.60	1991. 10
“道路技術の分野でも国際貢献を”	萩原 浩	No.61	1992. 1
明石海峡大橋の主塔基礎の完成	佐伯彰一	No.62	1992. 4
海洋架橋の歴史	岡田哲夫	No.63	1992. 7
瀬戸大橋を守り、伝える	松本弘輝	No.64	1992. 10
ネクストウェイ	玉田博亮	No.65	1993. 1
科学技術雑感	西内 彬	No.66	1993. 4
役割分担	新野 博	No.67	1993. 7
秋菊の物語	平林忠正	No.68	1993. 10
鉄道再評価と技術的鳥瞰	野村紀夫	No.69	1994. 1
子供達の心に響いた本四架橋	宮崎 潮	No.70	1994. 4
岡山今と昔	松本敦義	No.71	1994. 7
ポスト四全総への期待	藤原良一	No.72	1994. 10
ケーブル工事雑感	越村一雄	No.73	1995. 1
自然の威力を直視しよう	萩原 浩	No.74	1995. 4
兵庫県南部地震に思う	佐伯彰一	No.75	1995. 7
うまし	松本弘輝	No.76	1995. 10
子規に思う	藤川寛之	No.77	1996. 1
瀬戸大橋雑感	多田和夫	No.78	1996. 4
長大橋技術の継承、高度化	縣 保佑	No.79	1996. 7
瀬戸内しまなみ海道	加島 聰	No.80	1996. 10
I S O9000との出会い	日野西光温	No.81	1997. 1
125年前	菊池徳彌	No.82	1997. 4
企業マインドの実践	辰巳正明	No.83	1997. 7
人工停滞の時代	安田達男	No.84	1997. 10
外国語の奨め	蟹澤康人	No.85	1998. 1
明石海峡大橋にあたって思うこと	佐伯彰一	No.86	1998. 4
印象に残る海中工事	加島 聰	No.86	1998. 4

明石海峡大橋と私	北川 信	No.86	1998. 4
長大橋管理のコスト縮減	星野 満	No.87	1998. 7
未来の古道	中嶋幸彦	No.88	1998. 10
明石大橋の管理元年	奥川淳志	No.89	1999. 1
本四3ルート完成	加島 聡	No.90	1999. 4
二つの斜張橋で目指したもの	谷中幸和	No.90	1999. 4
新尾道大橋と多々羅大橋に関して思うこと	秋山晴樹	No.90	1999. 4
長大橋建設の明日に向けて	蟹沢康人	No.91	1999. 7
自航台船「うましま」の開発について	平山純一	No.91	1999. 7
開通に思う	藤井周志	No.91	1999. 7
採算性の向上について	木挽孝紀	No.92	1999. 12
はるかな未来に向けて	村田正信	No.93	2000. 4
管理時代における技術者の視点	縣 保佑	No.94	2000. 8
13年目の瀬戸大橋	平山純一	No.95	2000. 12
青函トンネルと本州四国連絡橋	小笠原憲一	No.96	2001. 4
予防保全の視点	谷中幸和	No.97	2001. 8
最近の動きなどー20世紀から21世紀へー	佐野徹治	No.98	2002. 3
最適管理基準	星野 満	No.99	2002. 9
リスク管理	北川 信	No.100	2003. 3
先達はあらまほしき事なり	森 章	No.101	2003. 9
自然を畏怖する心	高澤 勤	No.102	2004. 3
民営化雑感	中村 守	No.103	2004. 9
なぜだろうなぜかしら	藤井周志	No.104	2005. 3
私の神様論	村田正信	No.105	2005. 9
本四技報に期待する	堀切民喜	No.106	2006. 3
技術開発重点プログラムへの期待	星野 満	No.107	2006. 9
廣井勇に学ぶ	北川 信	No.108	2007. 3
落橋の映像	中村 守	No.109	2007. 9
「現場力」に思う	伊藤周雄	No.110	2008. 3
道路構造物のリスクマネジメント	富田大造	No.111	2008. 9
技術者マインド	岸本良孝	No.112	2009. 3
目	仁木清貴	No.113	2009. 9
瀬戸内企業ということ	奥田 基	No.114	2010. 3
弛み無い技術開発を	帆足博明	No.115	2010. 9
管理の時代に思うこと	上野進一郎	No.116	2011. 3
マネジメントはマーケティングとイノベーション	佃 長次	No.117	2011. 9
橋梁ヘルスマニタリング	藤原 亨	No.118	2012. 3
想定外	平原伸幸	No.119	2012. 9
千三百年の心構え	足立 徹	No.120	2013. 3
技術の横串を通そう	三原修二	No.121	2013. 9
T型技術者	吉川章三	No.122	2014. 3
新たな維持管理時代に向けて何をなすべきか	金崎智樹	No.123	2014. 9
『挑戦』の第一歩	中尾俊哉	No.124	2015. 3
業務の積み重ねによる保全技術の深耕・蓄積	伊藤進一郎	No.125	2015. 9
チャレンジ!!	古家和彦	No.126	2016. 3
千年、二千年の時を超えて	酒井利夫	No.127	2016. 9
技術開発の推進	荻原勝也	No.128	2017. 3
保全事業もAIで超効率化	川上賢明	No.129	2017. 9
失敗学	北口雅章	No.130	2018. 3

■共通 (橋梁下部工)

流れと波が共存する場における流体力の評価について	野村直茂	No.2	1977. 10
太径鉄筋の継手と付着に関する調査	佐伯康二	No.2	1977. 10
風化花崗岩のクリープ特性について	喜岡直太郎・森本則行・谷中幸和	No.2	1977. 10
吊橋塔基部のグラウト注入実験	佐伯康二	No.6	1978. 10
鋼設置ケーソン設計要領 (案)	奈良平俊彦	No.7	1979. 1
船舶の衝突に対する緩衝工模型実験	大町武司	No.13	1980. 7
大型鉄骨鉄筋コンクリート設計要領・同解説 (案)	金光 宏・大町武司・樋口康三	No.13	1980. 7
深いニューマチックケーソンの掘削工法に関する検討	金光 宏・野村直茂・大町武司	No.19	1982. 1
大型鉄骨鉄筋コンクリート橋脚設計要領 (案) の確認実験	金光 宏・樋口康三・栗野純孝	No.21	1982. 7
緩衝工の設計要領 (案)	神 弘夫・栗野純孝	No.24	1983. 4
耐震壁付きRC橋脚の設計 (解析編)	塩井幸武・神 弘夫・吉田好孝	No.26	1983. 10
耐震壁付きRC橋脚の設計 (実験編)	塩井幸武・加島 聰・吉田好孝	No.27	1984. 1
FEM・RBSMによる基礎の支持力・変形解析	栗野純孝	No.28	1984. 4
脚付ケーソン基礎の耐震安定性	塩井幸武・吉田好孝	No.32	1985. 1
吊橋アンカレッジに用いたマスコンクリートの品質分析	宮下 力・吉田好孝	No.50	1989. 4
低発熱コンクリート	山田勝彦・新田篤志・二宮仁司	No.54	1990. 4
マスコンクリートの塗装に関する調査	山田勝彦	No.58	1991. 4
マスコンクリート用高流動コンクリート設計・施工基準同解説	森下尊久	No.73	1995. 1
マスコンクリートの塗装に関する調査 (その2)	野村直茂・森下尊久	No.74	1995. 4
高架橋の多径間連続化における耐震設計	山岸一彦・池田 博・大和屋豊・高月俊治	No.75	1995. 7
長大橋の耐震照査に用いる大規模地震動の検討	二宮仁司	No.95	2000. 12
マスコンクリートの塗装に関する調査及び評価	川上賢明・大西貴浩	No.96	2001. 4
海峽部コンクリート構造物の現況	川上賢明・林 昌弘	No.97	2001. 8
水中鉄筋コンクリート (水中RC) の施工性確認実験	角 和男	No.100	2003. 3
海峽部PC橋の長寿命化対策	津留和彦・山田郁夫	No.100	2003. 3
コンクリート構造物の点検手法と長寿命化対策の事例	津留和彦・石原和幸	No.102	2004. 3
耐震補強検討に用いる大規模地震動の設定	福永 勸・遠藤和男	No.111	2008. 9
海峽部橋梁マスコンクリート表面被覆要領の制定	荻原勝也・花井 拓	No.121	2013. 9
電着防食と電気防食を併用した大水深海中基礎の防食方法に関する検討	竹口昌弘・北村岳伸	No.126	2016. 3
海峽部橋梁マスコンクリート表面被覆要領の改訂	花井 拓・山根 彰・楠原栄樹	No.129	2017. 9
この10年における本四連絡橋の耐震補強	西谷雅弘・田村 正	No.130	2018. 3
本四連絡橋 海中基礎防食のあゆみ	鎌田将史・貴志友基・岡本 豊	No.130	2018. 3

■共通 (橋梁上部工)

吊橋塔基部の模型実験	加島 聰	No.1	1977. 7
東大維橋におけるケーブル応力の測定調査	北川 信	No.1	1977. 7
80キロ鋼溶接継手の疲労試験	奥川淳志	No.2	1977. 10
吊橋ケーブルの二次応力測定 (平戸大橋)	北川 信	No.3	1978. 1
鋼床版の変形特性に関する調査	福井幸夫	No.4	1978. 3
吊橋ハンガーロープの引張および疲労試験	奥川淳志	No.5	1978. 7
塗装を施した摩擦接合継手の性能試験	榎波義幸・越智 勝・森 邦久	No.6	1978. 10
ケーブルバンド耐荷力に関する調査試験	多田和夫	No.7	1979. 1
長支間道路吊橋の計画 (要約)	川崎偉志夫	No.8	1979. 4
橋梁用ロープの曲げ疲労試験	岸本良孝・竹之内博行	No.11	1980. 1
PWS用ゲージワイヤの測長精度	鈴木周一	No.12	1980. 4

P C斜張橋の紹介	小川英信・岡野 哲	No.13	1980. 7
リブ十字継手の疲労許容応力	竹名興英・岸本良孝・伊藤文夫	No.16	1981. 4
吊構造物を有する橋梁の変位制御に関する考察	金光 宏・樋口康三	No.18	1981. 10
疲労許容応力見直し	旭 一穂・竹名興英・平野 茂	No.18	1981. 10
緩衝桁伸縮装置	松浦章夫	No.20	1982. 4
吊橋主塔架設時の制振対策	成井 信・金崎智樹	No.21	1982. 7
長大橋梁の点検補修用作業車	室谷貞雄	No.22	1982. 10
鋼床版舗装	村上憲司・新田篤志	No.22	1982. 10
高力ボルト摩擦接合継手のすべり試験	香川祐次・岸本良孝	No.25	1983. 7
疲労を考慮したトラス部材の製作と検査	阪本謙二・鳥海隆一	No.35	1985. 10
主ケーブル材料としての高強度鋼線	森山 彰	No.50	1989. 4
強風下での吊橋の挙動解析	辰巳正明・秦 健作	No.53	1990. 1
二径間吊橋の構造検討	吉田 修	No.56	1990. 10
上部構造設計基準の改訂と運用	奥川淳志・高城信彦	No.58	1991. 4
本州四国連絡橋での摩擦接合用高力ボルトの使用実績	奥川淳志・高城信彦・大江慎一	No.59	1991. 7
大型風洞施設	保田雅彦・鈴木周一・勝地 弘	No.59	1991. 7
本州四国連絡橋におけるF E M解析の適用事例	奥川淳志・高城信彦・山口和範	No.60	1991. 10
長大橋梁の維持管理	糸日谷淑光	No.60	1991. 10
高力皿ボルトを使用した鋼床版現場継手の特性	奥川淳志・高城信彦・大江慎一	No.61	1992. 1
吊橋ケーブル防食方法の検討	保田雅彦・鈴木周一・木村一也	No.61	1992. 1
鋼橋等塗装基準の改訂	糸日谷淑光	No.62	1992. 4
耐力点締付法を用いる摩擦接合用高力ボルトの品質	高城信彦	No.63	1992. 7
吊橋ケーブルバンドボルトの軸力管理	林 義信・平野信一	No.65	1993. 1
中間橋脚を有する斜張橋の構造特性	奥川淳志・高城信彦・山口和範	No.65	1993. 1
吊橋主塔設計要領の安定照査法	高城信彦	No.66	1993. 4
鋼床版の横リブ設計法に関する調査試験	松本 毅・遠藤和男	No.66	1993. 4
高張力鋼の長寿命での疲労強度	奥川淳志・大江慎一	No.66	1993. 4
ピン定着ケーブルバンドの構造特性	大橋治一	No.67	1993. 7
新たな機構の碍子活線洗浄装置の疲労実験	井上 徹・広田昭次	No.67	1993. 7
デッキとスティフナの溶接部の疲労実験	松本 毅・遠藤和男	No.67	1993. 7
鋼圧縮部材の残留応力調査	奥川淳志・高城信彦・大江慎一	No.68	1993. 10
海上橋梁における横風による自動車走行性への影響	田島照義	No.71	1994. 7
斜張橋主桁腹板の座屈実験報告	藤井裕司・山口和範・遠藤和男	No.71	1994. 7
長期防錆型塗装の塗膜劣化メカニズム解明へのアプローチ	中元雄治	No.72	1994. 10
新設計活荷重と既設橋の照査	藤井裕司・松本 毅	No.72	1994. 10
吊橋式橋梁鋼床版箱桁ダイヤフラム部の疲労試験	奥川淳志・大江慎一	No.72	1994. 10
「鋼上部構造の設計にF E M解析を適用するためのガイドライン(案)」の運用上の留意点	大橋治一・大川宗男	No.75	1995. 7
鋼橋における固定支承の地震時の挙動と支分部補強	樋口康三・大橋治一	No.77	1996. 1
ボルト締付試験報告	奥田 基・矢野賢晃・末廣弘靖	No.77	1996. 1
高力ボルトの緩み確認へのアプローチ	林 義信・森脇正生	No.78	1996. 4
吊橋主塔の引張接合継手の製作架設	佐々木雅敏・宮口典博・山口和範	No.82	1997. 4
長大トラス吊橋のハンガーピン定着部補強構造の力の伝達機構と疲労挙動	大橋治一・大川宗男	No.82	1997. 4
送気乾燥による吊橋ケーブル防食試験	古家和彦	No.84	1997. 10
鋼床版構造の長寿命域疲労試験結果	大橋治一・梁取直樹	No.85	1998. 1
主塔点検補修用ロボットの開発	土山正己・坂本光重	No.85	1998. 1
吊形式橋梁箱桁のトラス・横桁接合部の疲労挙動	大橋治一・梁取直樹	No.89	1999. 1
主塔・主桁に用いる補剛板の初期たわみの実測データ	大橋治一・森山 彰・山口和範	No.89	1999. 1
鋼床版実物大試験体の載荷試験結果	大橋治一・梁取直樹	No.89	1999. 1

海峡部橋梁用車両防護柵の性能確認	山田郁夫	No.95	2000. 12
鋼床版の疲労に関する調査・検討	森山 彰・薄井稔弘	No.103	2004. 9
吊橋ケーブル送気乾燥システムにおける腐食物質調査 および改善等の検討	上村博文・池田秀継	No.103	2004. 9
劣化した亜鉛めっき部材の補修検討	杉本 健	No.104	2005. 3
吊橋ケーブル用高強度亜鉛めっき鋼線の遅れ破壊に対する 安全性評価	秦 健作・森下尊久・遠山直樹	No.105	2005. 9
高耐久性ふっ素樹脂塗料（仮称）の開発	小林克己	No.107	2006. 9
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	岩垣富春・末廣弘靖・小原 誠	No.107	2006. 9
鋼橋の疲労に着目した点検箇所に関する考察	森山 彰・薄井稔弘	No.107	2006. 9
ケーブルの腐食環境下における水素侵入の実験的研究	小林克己・菊池祥子	No.108	2007. 3
吊橋ケーブルバンドボルトの管理手法に関する検討	森山 彰	No.108	2007. 3
無機ジンクリッチペイントの剥離に関する調査検討	長尾幸雄	No.109	2007. 9
舗装維持修繕要領（案）とマイクロサーフェシング適用指針 （案）の制定	矢野保広・田村 正	No.109	2007. 9
橋梁管理路に対するFRP材料の適用性検討	秦 健作・大谷康史・薄井稔弘	No.109	2007. 9
吊橋ケーブルバンドの維持管理	山田郁夫・森山 彰	No.110	2008. 3
本四連絡橋のケーブル振動と耐震対策	山田郁夫・楠原栄樹・麓興一郎	No.110	2008. 3
本四連絡橋の塗替塗装	長尾幸雄	No.110	2008. 3
耐久性ふっ素樹脂塗料上塗（暫定）規格の制定	栗野純孝・矢野賢晃・籠池利弘	No.116	2011. 3
海峡部長大橋梁の塗膜状況調査	大塚雅裕・森脇正生	No.119	2012. 9
非破壊検査による吊橋ハンガーロープの経年変化の調査	大谷康史・森山 彰・貴志友基	No.121	2013. 9
環境に配慮した塗料の開発	大塚雅裕・蔵森和生	No.122	2014. 3
供用段階におけるケーブルバンドすべりに対する維持管理方法	小林義弘・池田秀継	No.122	2014. 3
重防食塗装の劣化予測の高度化	大塚雅裕・楠原栄樹	No.124	2015. 3
ケーブル気密化のための塗装仕様検討と試験施工	森山 彰・梶尾光邦	No.124	2015. 3
鋼床版Uリブビード貫通亀裂検出法の開発と疲労関連業務の 体制整備	溝上善昭・森山 彰	No.125	2015. 9
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	溝上善昭・森山 彰・貴志友基	No.128	2017. 3
本四連絡橋の塗替塗装に関する取組	久米昌夫・竹口昌弘	No.130	2018. 3
本州四国連絡橋における疲労対策	林 昌弘・溝上善昭	No.130	2018. 3
吊橋ケーブル送気乾燥システムの管理20年	貴志友基・朝倉義博	No.130	2018. 3

■共通（その他）

気象海象予測手法	西野新造	No.3	1978. 1
閃光式航空障害灯調査	亀山正俊	No.4	1978. 3
架橋関連地域の経済・輸送構造の予測手法	黒滝義則・加島延行	No.4	1978. 3
架橋関連地域の経済・輸送構造の予測結果	黒滝義則	No.8	1979. 4
埋蔵文化財調査	長尾和守	No.11	1980. 1
海中工事における潮流条件の設定	山田勝彦	No.12	1980. 4
大気測定車による大気質調査	阿部明弘	No.15	1981. 1
既存橋梁の架橋インパクト分析	黒瀧義則	No.23	1983. 1
本州四国連絡橋におけるレーダ電波障害軽減策	佃 長次	No.51	1989. 7
改良型灯浮標の設計・製作	石橋良哉・井上 徹	No.51	1989. 7
本州四国連絡橋公団の工業所有権について	森谷俊美	No.63	1992. 7
トンネル内ラジオ再放送設備	山中 清	No.64	1992. 10
磁石車輪ゴンドラの開発	土山正己・坂本光重	No.88	1998. 10

鋼斜張橋ケーブル材料としての高強度亜鉛めっきPC鋼より線の物理特性	金子正猪・秋山晴樹・村瀬佐太美	No.93	2000.4
本四疲労設計のデータベース化	貴志友基	No.96	2001.4
建設CALS/ECの動向	下村 稔・古村 学	No.96	2001.4
剛体基礎の簡易応答計算法の開発	福永 勸	No.97	2001.8
我が国におけるITSの現況	塚原 修	No.97	2001.8
本州四国連絡橋耐風設計基準(2001)の制定	楠原栄樹・花井 拓	No.98	2002.3
主塔用塗替塗装装置の開発	坂本光重・香川 晃・河野正樹	No.101	2003.9
海峡部鋼箱桁内の腐食環境調査と塗装管理計画	村上博基・杉本 健	No.102	2004.3
簡易型トンネル壁面掃除装置の検討	山崎純一・廣田昭次・谷 大治	No.103	2004.9
真空吸着車輪ゴンドラの開発	坂本光重・中村 修	No.104	2005.3
平成16年台風被害報告	川田政史・山本和弘・杉本祐一	No.104	2005.3
機械設備の障害事例ネットワークの評価と改善	坂本光重・朝倉義博・中村 修	No.106	2006.3
防災における強風予測と対応について	藤谷邦夫・藤澤幸廣	No.106	2006.3
瀬戸中央道管制システムの刷新	馬場伸二・近藤貴重	No.107	2006.9
簡易型トンネル壁面清掃装置の最適化	廣田昭次・香川 晃	No.108	2007.3
真空吸着車輪ゴンドラの実用化試験	三谷宣博・今井清裕・西井智紀	No.109	2007.9
明石海峡大橋10周年、瀬戸大橋20周年特集号について	森 邦久	No.110	2008.3
本四高速道路の維持管理	毛利徳成	No.110	2008.3
本四高速道路の保全管理概要	岩垣富春・河野晴彦	No.110	2008.3
本四高速道路の防災管理	竹野 毅・坂本佳也	No.110	2008.3
本四高速道路の交通管理	石原和幸・坂本佳也	No.110	2008.3
本四連絡橋の動態観測	楠原栄樹・河藤千尋	No.110	2008.3
本四連絡橋の防食	酒井和吉・菊池祥子	No.110	2008.3
料金割引による交通量の変動と経済効果	重松 豊・杉本 健	No.114	2010.3
休息施設における太陽光発電設備の整備	松永陽次・近藤貴重	No.114	2010.3
埋設ジョイントの損傷原因と補修についての一考察	金田崇男・石橋清美	No.114	2010.3
排水処理を工夫した尾道館内高機能舗装化工事	胸永和頼・熊野善彦・石井一知	No.114	2010.3
米国長大吊橋の維持管理の現状報告	栗野純孝・西谷雅弘・杉山 剛	No.115	2010.9
道路照明柱の基部腐食問題への対応	明野晃治	No.119	2012.9
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	今井清裕・杉山剛史	No.119	2012.9
コンクリート構造物の現況と評価	酒井和吉・大藤時秀・籠池利弘	No.120	2013.3
舗装マネジメントシステムの構築	杉山剛史・今井清裕	No.121	2013.9
技術開発計画(H21-H25)の成果	荻原勝也・花井 拓・遠山直樹	No.123	2014.9
LED照明の海峡部橋梁自歩道への適用	植田章弘・小畑哲也	No.124	2015.3
次世代移動無線の導入検討と整備	玉津和哉	No.125	2015.9
点検補修用作業車の変遷	廣田昭次・松尾俊宏	No.126	2016.3
交通管制システムの一元化集約と仮想化導入	三橋直樹	No.127	2016.9
技術開発計画(H26-H28)の成果	荻原勝也・西谷雅弘	No.129	2017.9
本州四国連絡高速道路の経済効果分析	下元俊英・前島一陸	No.129	2017.9
本四高速における維持管理と技術開発	荻原勝也	No.130	2018.3
道路維持管理設備の改善と今後の課題	朝倉義博・吉本紀一・小野祥史・明野 晃治	No.130	2018.3

■神戸～鳴門ルート

・明石海峡大橋

明石海峡における海中防食試験	森本隆也	No.1	1977.7
大型振動台による下部構造-地盤系の模型実験(その1)	樋口康三	No.3	1978.1

大型振動台による下部構造-地盤系の模型実験 (その2)	樋口康三	No.4	1978. 3
神戸層水ジェット掘削試験	藍谷武紀	No.5	1978. 7
神戸層載荷試験	高橋幸蔵・有田 稔	No.5	1978. 7
明石海峡大橋補剛桁風洞実験	加島 聰・大橋治一・秋山晴樹	No.6	1978. 10
明石海峡大橋主塔基礎洗掘防止工実験	加島 聰・田中宗博	No.7	1979. 1
舞子沖地質調査 (その1) 工事報告	神 弘夫	No.10	1979. 10
明石海峡大橋主塔基礎洗掘防止工実験 (その2)	加島 聰・古屋信明	No.14	1980. 10
明石海峡大橋海中基礎の調査概況	奈良平俊彦	No.15	1981. 1
明石海峡大橋主塔基礎の施工法検討	奈良平俊彦・加島 聰	No.16	1981. 4
舞子沖地質調査 (その2) 工事報告	神 弘夫	No.17	1981. 7
舞子沖地質調査工事報告 (3)	神 弘夫・岩屋勝司・土田 宝	No.23	1983. 1
傾斜二層地盤の支持力に関する検討	塩井幸武・神 弘夫・栗野純孝	No.25	1983. 7
松帆沖地質調査	岩屋勝司・土田 宝・小林克己	No.28	1984. 4
明石海峡大橋主塔基礎洗掘防止工実験 (その3)	北川 信・森 邦久	No.34	1985. 7
明石海峡大橋主塔基礎施工調査	岩屋勝司・土田 宝・植村和宏	No.34	1985. 7
明石海峡大橋の耐震設計	河口浩二	No.49	1989. 1
明石海峡大橋2P・3Pケーソン設計・製作	鈴木幹啓・佐々木雅敏・鳥海隆一・土谷政治	No.51	1989. 7
明石海峡大橋大規模水中コンクリート実験	坂本光重・樋口康三・北口雅章	No.51	1989. 7
明石海峡大橋主塔基礎洗掘防止工実験 (その4)	高塚正修・佐々木雅敏・土谷政治	No.52	1989. 10
明石海峡大橋主塔基礎の設計 (第一報)	保田雅彦・鈴木幹啓・樋口康三	No.52	1989. 10
明石海峡大橋耐風設計要領 (案)	辰巳正明・秦 健作・竹内政彦	No.52	1989. 10
明石海峡大橋補剛桁の耐風性 (中間報告)	保田雅彦・平原伸幸	No.52	1989. 10
明石海峡大橋2P・3P鋼ケーソン設置	高塚正修・佐々木雅敏・北口雅章	No.53	1990. 1
明石海峡大橋ケーソン沈設設備	坂本光重・藤原洋一・広田昭次	No.53	1990. 1
明石海峡大橋主塔の安定性 (主塔断面形状の選定)	岡野 哲・栗野純孝・森下尊久	No.54	1990. 4
明石海峡大橋作業基地の設計と施工	阿部明宏・栗原敏広・池田定三	No.55	1990. 7
明石海峡大橋上部工耐震設計法の検討	辰巳正明・藤田和朗・池末泰輔	No.56	1990. 10
明石海峡大橋1Aアンカレイジ基礎の設計・施工 (その1)	加島 聰・佐野幸洋	No.59	1991. 7
明石海峡大橋2P・3P主塔基礎特殊水中コンクリートの施工	岡田凌太・上田忠夫・那須清吾	No.59	1991. 7
明石海峡大橋1Aアンカレイジ基礎の設計・施工 (その2)	加島 聰・佐野幸洋	No.60	1991. 10
明石海峡大橋大型風洞試験全橋模型	保田雅彦・鈴木周一・勝地 弘	No.60	1991. 10
橋梁用マスコンクリートにおける二成分系低発熱型高流動コンクリートの開発 (その1)	金沢克美・有馬 勇・末永清冬・村田知司	No.62	1992. 4
明石海峡大橋4Aアンカレイジ土留工の設計と施工	有馬 勇・末永清冬・村田知司	No.62	1992. 4
橋梁用マスコンクリートにおける二成分系低発熱型高流動コンクリートの開発 (その2)	有馬 勇・末永清冬	No.63	1992. 7
明石海峡大橋ケーブルアンカーフレームの設計	平野 茂・矢野賢晃	No.63	1992. 7
明石海峡大橋主塔基礎2Pコンクリートプラント船の動揺計測解析	岡田凌太	No.64	1992. 10
明石海峡大橋2P・3P気中コンクリート工事	岡田凌太・上田忠夫・那須清吾	No.66	1993. 4
明石海峡大橋主塔基礎地盤変位の計測と評価 (第一報)	山縣 守・吉田好孝・岡田凌太・那須清吾	No.66	1993. 4
明石海峡大橋大型風洞試験 (一樣流試験結果)	保田雅彦・鈴木周一・勝地 弘	No.67	1993. 7
明石海峡大橋主塔の景観設計	保田雅彦・吉田好孝	No.67	1993. 7
明石海峡大橋大型風洞試験の乱流試験結果 (第一報)	北川 信・鈴木周一・勝地 弘	No.68	1993. 10
明石海峡大橋の主塔制振対策	辰巳正明・森 邦久・秦 健作	No.68	1993. 10
明石海峡大橋1A・4Aケーブルアンカーフレーム工事施工実績	糸日谷淑光・有馬 勇	No.69	1994. 1
低発熱型コンクリートの温度応力ひび割れ特性	那須清吾	No.69	1994. 1
明石海峡大橋サドルの設計・製作	吉元郁男・福永 勸	No.69	1994. 1

明石海峡大橋のバンド・ハンガー構造 (その1)	河口浩二・福永 勸	No.70	1994. 4
低発熱型コンクリートの耐ひび割れ特性とその評価方法	那須清吾	No.70	1994. 4
明石海峡大橋主塔の製作・精度管理	秦 健作・小林義弘	No.70	1994. 4
明石海峡大橋のフラッター特性に関する検討	北川 信・鈴木周一・勝地 弘	No.71	1994. 7
明石海峡大橋のパイロットロープ渡海	河口浩二・福永 勸・北川竜三	No.71	1994. 7
明石海峡大橋のバンド・ハンガー構造 (その2)	河口浩二・福永 勸	No.71	1994. 7
明石海峡大橋1 Aアンカレイジ基礎中詰コンクリートの施工	糸日谷淑光・斉藤哲男	No.72	1994. 10
明石海峡大橋1 A・4 Aアンカレイジの施工報告	有馬 勇・糸日谷淑光	No.73	1995. 1
明石海峡大橋の道路床組の設計	金崎智樹・大江慎一・井上純三	No.73	1995. 1
明石海峡大橋のキャットウォーク構造	河口浩二・福永 勸	No.74	1995. 4
明石海峡大橋大型風洞試験でのガスト応答特性に関する検討	北川 信・金崎智樹・勝地 弘	No.75	1995. 7
明石海峡大橋補剛トラスの設計	金崎智樹・大江慎一・井上純三	No.75	1995. 7
明石海峡大橋プレキャストパネルの設計・施工	那須清吾・斉藤哲男	No.76	1995. 10
兵庫県南部地震による明石海峡大橋の修正設計	保田雅彦・大江慎一・河口浩二	No.77	1996. 1
明石海峡大橋主塔架設工事報告	秦 健作・小林義弘	No.78	1996. 4
明石海峡大橋補剛桁架設 (大ブロック架設)	大江慎一・伊藤進一郎・河藤千尋	No.79	1996. 7
明石海峡大橋アンカレイジの上屋計画	徳永剛平・石原和幸	No.81	1997. 1
明石海峡大橋船舶緩衝工の設計	帆足博明・谷口貴成	No.81	1997. 1
明石海峡大橋ケーブルの製作・架設	河口浩二	No.86	1998. 4
明石海峡大橋補剛桁製作・架設工事	大江慎一・今井清裕・杉本 健	No.86	1998. 4
明石海峡大橋鋼床版舗装	栗野純孝・森下尊久	No.86	1998. 4
明石海峡大橋動態観測システム	阿部和智・天野耕一	No.86	1998. 4
明石海峡大橋の維持管理設備	越智数夫・山本浩之・小野祥史・小谷 剛	No.86	1998. 4
明石海峡大橋のライトアップ	阿部和智・日里正夫	No.86	1998. 4
明石海峡大橋の景観検討作業	藤田和朗	No.86	1998. 4
明石海峡大橋の耐震設計と兵庫県南部地震時の地質応答解析	森谷俊美・栗原敏広・後藤 敦	No.86	1998. 4
明石海峡大橋のケーブル防食システム	下村 稔・杉山剛史・花井 拓	No.86	1998. 4
明石海峡大橋のケーブル後期工事施工報告	下村 稔・杉山剛史・西岡早和子	No.92	1999. 12
明石海峡大橋のハンガーロープ制振対策	竹口昌弘	No.93	2000. 4
明石海峡大橋における台風時の桁応答観測・解析	大廻 聡	No.94	2000. 8
G P Sによる明石海峡大橋の吊橋形状調査結果	鈴木周一・竹口昌弘・梁取直樹	No.95	2000. 12
海峡部橋梁箱桁用塗装装置の開発	坂本光重・廣田昭次	No.99	2002. 9
明石海峡大橋伸縮装置取付部の補強	上村博文・弓山茂樹	No.101	2003. 9
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	楠原栄樹	No.108	2007. 3
明石海峡大橋の維持管理	仁木清貴	No.110	2008. 3
明石海峡大橋イルミネーションケーブルの振動計測	楠原栄樹・横井芳輝	No.111	2008. 9
明石海峡大橋の大規模地震に対する耐震性照査	福永 勸・遠藤和男	No.111	2008. 9
明石海峡大橋リンク式伸縮装置耐震補強	遠藤和男・久米昌夫	No.117	2011. 9
リスクマネジメントによる長大橋の維持管理	小林義弘・河野晴彦	No.118	2012. 3
明石海峡大橋主塔基礎鋼ケーソンの腐食調査	麓興一郎・信重和紀・大爺健司	No.126	2016. 3
明石海峡大橋供用20周年によせて	小林義弘	No.130	2018. 3
・大鳴門橋			
大鳴門橋における多柱式基礎の設計	上田浩司・土田泰秀	No.7	1979. 1
大鳴門橋多柱式基礎の施工報告	遠藤武夫・赤間 信	No.10	1979. 10
大鳴門橋支持岩盤の確認	宮島圭司	No.11	1980. 1
大鳴門橋ケーブルアンカーフレームの設計	田中淳之	No.13	1980. 7
大鳴門橋主塔風洞実験	田中淳之	No.16	1981. 4

大鳴門橋ケーブルサドルの設計	田中淳之・藤井裕司	No.18	1981. 10
大鳴門橋アンカレイジの施工報告	山口浩二	No.19	1982. 1
大鳴門橋主塔の製作・架設	田中淳之	No.21	1982. 7
大鳴門橋バックステイ径間の製作	多田和夫	No.24	1983. 4
大鳴門橋ケーブルサドルの製作	鈴木周一	No.26	1983. 10
大鳴門橋ケーブル製作	奥田 基	No.27	1984. 1
大鳴門橋ケーブルバンドの設計	淵田政信・鈴木周一	No.28	1984. 4
側塔を有する吊橋のケーブル架設工法（大鳴門橋）	淵田政信・鈴木周一	No.30	1984. 7
大鳴門橋の補剛桁製作工事	淵田政信・江藤隆男	No.34	1985. 7
大鳴門橋と関連区間の開通	松本弘輝	No.36	1985. 12
大鳴門橋補剛桁架設工事	淵田政信	No.36	1985. 12
大鳴門橋と関連区間の開通	奈良平俊彦	No.36	1985. 12
大鳴門橋関連区間の維持管理設備	谷口 肇	No.36	1985. 12
大鳴門橋照明用柱の耐風検討	山田勝彦・秋元茂男	No.36	1985. 12
大鳴門橋ケーブル工事—その品質・精度	多田和夫	No.36	1985. 12
大鳴門橋基礎の挙動計測	樋口康三・小野下武	No.36	1985. 12
大鳴門橋関連区間の陸上部工事	西川雅博	No.36	1985. 12
大鳴門橋振動実験の報告	田中淳之・岩屋勝司・淵田政信	No.36	1985. 12
大鳴門橋の橋面舗装	淵田政信・川西芳則	No.36	1985. 12
大鳴門橋動態観測システム	多田和夫・亀山正俊・森下尊久	No.36	1985. 12
大鳴門橋緩衝工計画	金沢克義	No.36	1985. 12
大鳴門橋関連区間陸上部橋梁の塗膜劣化調査	中元雄治	No.70	1994. 4
大鳴門橋定点塗膜調査結果の報告	石橋清美・大西貴浩	No.95	2000. 12
大鳴門橋 1 A道路桁補修工事	酒井和吉・石元靖二	No.100	2003. 03
大鳴門橋補剛桁塗替塗装	角 和夫・石井一知・石元靖二	No.102	2004. 03
大鳴門橋における吊橋ハンガーロープの現況および対策	角 和夫・石井一知	No.103	2004. 09
大鳴門橋多柱基礎の耐震照査および耐震対策	古村 学・河藤千尋・角 和夫・石井一知	No.104	2005. 03
省力化を目指した主塔塗替塗装	角 和夫・松葉真人	No.105	2005. 09
共用道路における路面防護工の設置	角 和夫	No.105	2005. 09
大鳴門橋管理20年	佐藤昭光・角 和夫	No.106	2006. 03
大鳴門橋における吊橋ハンガーロープの定着部補修工法の検討	北川竜三・長尾幸雄	No.107	2006. 9
大鳴門橋の耐震補強対策検討	吉田茂司・真辺保仁・河藤千尋	No.108	2007. 3
大鳴門橋の維持管理	帆足博明	No.110	2008. 3
大鳴門橋（バックステイ径間部）落橋防止システム設置	越野 勝・溝上善昭	No.115	2010. 9
大鳴門橋のフラッター解析による耐風性再評価	福永 勸・角 和夫・竹口昌弘・遠藤和男	No.117	2011. 9
CFRCハンガーロープ管理基準の設定	楠原栄樹・森山 彰	No.118	2012. 3
海上橋梁管理路の劣化傾向と補修	森山 彰・貴志友基	No.122	2014. 3
定着部が腐食したハンガーロープの詳細調査と維持管理	金澤高宏・貴志友基・長尾幸雄	No.126	2016. 3
・門崎高架橋			
門崎高架橋の橋梁計画	宮下 力・古家和彦・熊野善彦	No.19	1982. 1
門崎高架橋岩ケーソン施工報告	宮下 力・土居敏彦・矢野保広	No.21	1982. 7
門崎高架橋の風洞試験	大島 久・宮下 力・大橋治一	No.22	1982. 10
門崎高架橋上部工の架設（計画編）	宮下 力・大橋治一・真辺保仁	No.26	1983. 10
門崎高架橋上部工の設計・製作	土居敏彦・大橋治一・中尾俊哉	No.26	1983. 10
門崎高架橋上部工の架設（架設編）	宮下 力・大橋治一・真辺保仁	No.27	1984. 1
門崎高架橋の橋面舗装	吉田 修・中尾俊哉	No.30	1984. 7
門崎高架橋の振動実験および風による振動計測	吉田 修	No.36	1985. 12

門崎高架橋仮設備撤去工事	淵田政信・川西芳則	No.41	1987. 1
門崎高架橋（3径間部）の耐風安定性の再評価	楠原栄樹	No.99	2002. 9
門崎高架橋（4径間部）の耐風安定性の再評価	楠原栄樹・遠山直樹	No.101	2003. 9
門崎高架橋耐風安定化部材の補修と耐風性確認計画	本田 学	No.102	2004. 3
門崎高架橋における塩害の実情と対策	村田知司・大西貴浩	No.111	2008. 9
門崎高架橋桁外面作業車用給電設備の開発	朝倉義博・敷地直城・東 秀樹	No.125	2015. 9

・上記以外の橋梁

撫養橋4Pオープンケーソン施工報告	大町武司・武山哲郎・中尾俊哉	No.21	1982. 7
亀浦高架橋の施工	富岡 紘・山本茂樹	No.24	1983. 4
伊毘高架橋下部工施工計画	植田正弘・才川 勉・中村富二夫	No.25	1983. 7
撫養高架橋杭の載荷試験	吉田 修・加藤嘉津次	No.31	1984. 10
撫養橋の風洞実験	田中淳之・多田和夫・長谷川芳己	No.33	1985. 4
撫養橋上部工の設計と施工	秋山晴樹・加藤嘉津次・秦 健作	No.40	1986. 10
松帆高架橋におけるアフターボンドPC鋼より線の施工	徳永剛平・吉中眞一郎	No.80	1996. 10
撫養南高架橋の動的解析	高月俊治・谷口貴成	No.80	1996. 10
舞子高架橋ケーソン基礎の施工	山田郁夫・西野直均・小河正次	No.81	1997. 1
撫養橋（上下線並列橋）の耐風応答特性	帆足博明・谷口貴成・貴志友基	No.82	1997. 4
灘川橋の設計と施工	川戸 彰・大川宗男	No.83	1997. 7
茶間川橋の設計と施工	川戸 彰・大川宗男	No.84	1997. 10
応力調整を用いたPC単径間ラーメン橋の設計と施工	大川宗男・弓山茂樹	No.87	1998. 7
太径PC鋼より線を用いた鶴崎川的设计	大川宗男・弓山茂樹	No.87	1998. 7
立石川橋工事報告	高塚正修・山根 彰	No.87	1998. 7
多径間連続鋼鈹桁形式の採用と施工上の特徴	木村一也	No.87	1998. 7
フレキシブル橋脚を有する伊毘高架橋の耐震補強設計	中村哲也・本田 学	No.103	2004. 9
伊毘高架橋の耐震補強工事	本田 学・川端 淳	No.105	2005. 9
亀浦架橋耐震補強工事の施工報告	越野 勝・藤澤幸廣	No.113	2009. 9
撫養橋および南・北高架橋の耐震補強検討	福永 勸・竹口昌弘	No.114	2010. 3
淡路島地震で被災した鋼橋の復旧工事	磯江 浩・吉丸直明	No.123	2014. 9
茶間川橋の耐震補強設計・施工	有馬敬育・福永 勸・麓興一郎	No.123	2014. 9
土佐泊浦高架橋の耐震補強設計・施工	村上博基・田中輝良	No.124	2015. 3
多径間連続PC橋(撫養高架橋)の耐震補強設計・施工	村上博基・横井芳輝	No.125	2015. 9
塩害を受けたPC橋(亀浦高架橋)の剥落対策	金澤高宏・貴志友基・長尾幸雄	No.125	2015. 9
木津高架橋の耐震補強設計・施工	村上博基・横井芳輝	No.127	2016. 9
孫崎高架橋支承補修に伴う挙動調査	新野貴大・貴志友基・長尾幸雄	No.129	2017. 9
第六伊毘高架橋塗替塗装工事における素地調整方法の比較検討	貴志友基・長尾幸雄	No.130	2018. 3

・その他

和泉層群ののり面工	原崎郁夫	No.11	1980. 1
津名一宮IC・洲本IC間における地盤改良工	阿部和智・高嶋 勉	No.38	1986. 4
西淡一大毛地区の修景緑化	伊吹浩太・岩垣富春・鎌田義人	No.38	1986. 4
淡路島南パーキングエリアの土壌式無放流・汚水処理設備	谷口 肇・中田昌利・谷 進	No.38	1986. 4
鳴門黒山地区の強風対策	山田勝彦・池田昭欣	No.41	1987. 1
道路建設と埋蔵文化財調査―淡路島内本四連絡道路における例―	細井 忍・原崎郁夫・平下忠一	No.44	1987. 10
切土のり肩の設計施工(淡路島内本四連絡道路緑PA)	永井俊男・山本茂樹	No.45	1988. 1
神戸側陸上部道路計画概要	蟹沢康人・森 章	No.53	1990. 1
舞子トンネル区間の地質と調査坑試験	河野英雄・鳥居 聡	No.57	1991. 1
舞子トンネルの設計・施工	河野英雄・三島功裕	No.64	1992. 10
TBMによる掘削工事報告	三島 功	No.65	1993. 1
テレビ電波障害影響予測と対策	綾 敬三	No.68	1993. 10

淡路島側陸上部津名以北区間における大阪層群軟質泥岩の現位置	徳永剛平	No.72	1994. 10
舞子トンネルにおける作業振動の限界と岩の掘削方法	岡澤達男・板垣勝則	No.73	1995. 1
未固結土砂地山における大断面トンネルの掘削	岩垣富春・青野 宏・浜村吉昭	No.80	1996. 10
舞子トンネル明り巻部におけるプレキャスト化工法の設計・施工	岩垣富春・浜村吉昭	No.82	1997. 4
舞子高架橋P C上部工の設計・施工	山田郁夫・宮口典博・小河正次	No.83	1997. 7
舞子トンネル北坑口の長大切土法面対策工	青野 宏・石倉健治・亀山寿仁	No.83	1997. 7
神戸ー鳴門ルートの交通管理・施設維持管理	住吉実雄・吉崎建一・村上茂之	No.84	1997. 10
舞子地区遮光施設等工事の設計・施工	古家和彦・宮口典博・小河正次	No.85	1998. 1
石の寝屋切土の動態観測結果	大川宗男・弓山茂樹	No.87	1998. 7
淡路I C・S Aの大規模盛土と濁水対策について	川戸 彰・平下忠一・池田秀継	No.87	1998. 7
舞子バスストップ連絡施設の施工	古家和彦・福田 誠	No.87	1998. 7
舞子トンネル換気防災設備	藤原洋一・廣田昭次・大浦義司	No.87	1998. 7
淡路島内の切土法面樹林化工法	足立克久	No.87	1998. 7
舞子トンネル下り線換気所除塵装置の改修	政田 潔・廣田昭次・香川 晃	No.109	2007. 9
舞子トンネル除塵装置のWJ方式への改修効果	小野祥二・亀井敏行・引田晋一	No.115	2010. 9
舞子トンネル換気用排風機の維持管理	朝倉義博・大浦義司	No.120	2013. 3
神戸淡路鳴門自動車道の盛土のり面の緊急点検及び対策検討	藤田憲二・磯江 浩	No.122	2014. 3
舞子トンネル防災システムの更新	松 俊宏・中村修・西井智紀	No.124	2015. 3

■児島～坂出ルート

・下津井瀬戸大橋

吊橋トンネル式アンカレイジの極限引抜き耐力の算定法 (下津井瀬戸大橋1 A)	金光 宏・大町武司・樋口康三	No.14	1980. 10
吊橋トンネル式アンカレイジの極限引抜き耐力の算定法 (下津井瀬戸大橋1 A) (その2)	金光 宏・大町武司・樋口康三	No.15	1981. 1
吊橋トンネル式アンカレイジの極限引抜き耐力の算定法 (下津井瀬戸大橋1 A) (その3)	金光 宏・大町武司・樋口康三	No.16	1981. 4
下津井瀬戸大橋の塔頂構造の設計	山根哲雄・村瀬佐太美	No.17	1981. 7
下津井瀬戸大橋ケーブル定着部構造検討	加島 聰・田中美宇	No.20	1982. 4
下津井瀬戸大橋ケーブル定着用ロッド疲労試験	谷中幸和・村瀬佐太美	No.26	1983. 10
下津井瀬戸大橋4 Aアンカレイジの施工 (その1)	山本紀夫・秋山晴樹・中元雄治	No.31	1984. 10
下津井瀬戸大橋4 Aアンカレイジの施工 (その2)	中元雄治・武藤礼布・上村博文	No.32	1985. 1
下津井瀬戸大橋1 Aトンネルアンカーの設計施工	竹内覚夫・吉田好孝	No.33	1985. 4
下津井瀬戸大橋タワーリンクの設計製作	奥川淳志・村瀬佐太美	No.34	1985. 7
下津井瀬戸大橋塔の製作	奥川淳志・村瀬佐太美	No.34	1985. 7
下津井瀬戸大橋塔架設工事	奥川淳志・下村 稔	No.37	1986. 1
下津井瀬戸大橋キャットウォーク架設 (その1)	奥川淳志・平原伸幸	No.39	1986. 7
下津井瀬戸大橋キャットウォーク架設 (その2)	奥川淳志・平原伸幸	No.40	1986. 10
下津井瀬戸大橋のケーブル架設	奥川淳志・平原伸幸	No.45	1988. 1
吊橋エンドリンクの精密点検	村卸靖訓・渡辺 諭	No.78	1996. 4
下津井瀬戸大橋A 3エンドリンク補修工事報告	池田定三・中西 治	No.81	1997. 1

・櫃石島高架橋

櫃石島高架橋剛結横梁の設計	大町武司・吉田 茂・北口雅章	No.33	1985. 4
櫃石島高架橋トラス用点検補修用作業車	坂本光重	No.39	1986. 7
櫃石島高架橋トラスの設計・製作・架設	藤井裕司・佐々木忠俊	No.40	1986. 10
櫃石島高架橋下部工の施工	北川 信・武田 茂	No.41	1987. 1
櫃石島高架橋P C上部工の施工	北川 信・池田 博	No.43	1987. 7

・櫃石島橋・岩黒島橋・岩黒島高架橋・羽佐島高架橋

櫃石島橋・岩黒島橋の設計	旭 一穂・新田篤志・田中美宇 …… No.17	1981. 7
櫃石島橋・岩黒島橋の架設検討	加島 聰・田中美宇・大江慎一 …… No.19	1982. 1
櫃石島橋3 P鋼製ケーソン設計	田島照義・高城信彦 …… No.30	1984. 7
岩黒島橋下部工事施工報告 (その1)	山根哲雄・飯塚力也・田村 隆 …… No.31	1984. 10
岩黒島橋下部工事施工報告 (その2)	丸尾 進・有馬 勇・田村 隆 …… No.32	1985. 1
岩黒島橋下部工の詳細設計	保田雅彦・日里正夫・大廣 始 …… No.35	1985. 10
岩黒島橋上部工の製作	保田雅彦・毛利徳成・大廣 始 …… No.38	1986. 4
櫃石島橋塔底板下面グラウト施工報告	金沢克義・伊藤豊秋 …… No.38	1986. 4
岩黒島橋ケーブルの設計と製作	保田雅彦・武山哲郎・野沢 学 …… No.39	1986. 7
櫃石島橋塔架設時の動吸振器式制振装置	金沢克義・河口浩二 …… No.41	1987. 1
羽佐島高架橋大ブロック架設	飯島邦治・勝地 弘 …… No.41	1987. 1
櫃石島橋の形状管理	金沢克義・佐藤昭光・武山哲郎 …… No.42	1987. 4
鋼床版現場溶接の自動超音波探傷検査	金沢克義 …… No.43	1987. 7
岩黒島橋のケーブル定着ブロック及び支承の設計・製作	大田 亨・藤原 亨 …… No.43	1987. 7
櫃石島橋大ブロック架設	金沢克義・佐藤昭光 …… No.45	1988. 1
櫃石島橋の船舶緩衝工	金沢克義 …… No.47	1988. 7
櫃石島橋・岩黒島橋ケーブル制振装置	馬場賢三・大田 亨・勝地 弘 …… No.47	1988. 7
櫃石島橋実橋振動実験	大田 亨・勝地 弘 …… No.48	1988. 10
岩黒島高架橋の設計・施工	大田 亨・川戸 彰 …… No.51	1989. 7
リンク式伸縮装置に関する現地計測	丸尾 進・藤谷邦夫・石橋清美 …… No.76	1995. 10
斜張橋ケーブル角折れ緩衝装置の損傷とその補修	藤井裕司・土井俊秋・平下忠一 …… No.93	2000. 4
斜張橋並列ケーブルのスペーサ型制振ダンパーの開発	藤谷邦夫・久米昌夫・矢野賢晃 …… No.101	2003. 9
斜張橋並列ケーブルの制振対策の検討	楠原栄樹・秦 健作・遠山直樹・花井 拓 …………… No.105	2005. 9
岩黒島橋の鋼床版垂直補剛材のひずみ計測と疲労評価	川端 淳 …… No.120	2013. 3
瀬戸大橋斜張橋 (櫃石島橋、岩黒島橋) の耐震補強設計	西谷雅弘・田村 正・平山靖之 …… No.130	2018. 3

・与島橋・与島高架橋

与島高架橋の設計	加島 聰・森谷俊美 …… No.25	1983. 7
与島高架橋地下連続壁の施工	加島 聰・森谷俊美・川田政史 …… No.31	1984. 10
与島橋3 P可動支承の設計とローラー耐久試験	平山純一・山岸一彦 …… No.37	1986. 1
与島橋の設計	平山純一・山岸一彦 …… No.37	1986. 1
与島高架橋ループ部上部工の設計	多田一正・村瀬佐太美・富田大造 …… No.40	1986. 10
与島高架橋の施工	村瀬佐太美・富田大造 …… No.42	1987. 4
与島高架橋ループ部鋼桁の製作・架設	村瀬佐太美・川上明彦 …… No.45	1988. 1

・南北備讃瀬戸大橋

水中発破 (その1)	長坂 進 …… No.1	1977. 7
水中発破 (その2)	長坂 進 …… No.2	1977. 10
900 t o nシンカーの製作	佐野幸洋 …… No.12	1980. 4
南北備讃瀬戸大橋5 P鋼製ケーソン設計・製作	奥川淳志・仁木清貴 …… No.15	1981. 1
南北備讃瀬戸大橋5 Pケーソン沈設作業	山下理雄・仁木清貴 …… No.17	1981. 7
南北備讃瀬戸大橋の海底掘削	山下理雄・大塚岩男 …… No.20	1982. 4
南北備讃瀬戸大橋5 P海中コンクリートの施工	山中鷹志・坂本光重 …… No.22	1982. 10
南北備讃瀬戸大橋3 P・4 Pケーソン製作施工	山中鷹志・岡澤達男 …… No.22	1982. 10
南北備讃瀬戸大橋のアンカレイジ表面仕上	村田正信 …… No.23	1983. 1
大型クレーン船を用いたパイロットロープ渡海実験	馬場賢三・平野 茂・吉元郁男 …… No.24	1983. 4
南北備讃瀬戸大橋4 Aケーブルアンカーフレームの設計	山中鷹志・栗原敏広 …… No.24	1983. 4
南北備讃瀬戸大橋7 A海中コンクリートの施工	三木啓造 …… No.26	1983. 10

北備讃瀬戸大橋塔の詳細設計	馬場賢三・成井 信・平野 茂 …… No.27	1984. 1
北備讃瀬戸大橋ケーブルサドルの設計 (その1)	馬場賢三・成井 信・吉元郁男 …… No.28	1984. 4
北備讃瀬戸大橋ケーブルサドルの設計 (その2)	馬場賢三・成井 信・吉元郁男 …… No.30	1984. 7
北備讃瀬戸大橋塔の風洞試験	馬場賢三・成井 信・平野 茂 …… No.30	1984. 7
南北備讃瀬戸大橋6 Pケーソン曳航・沈設 ～海中コンクリート施工	三木啓造・飯間秀雄・吉川章三 …… No.31	1984. 10
南北備讃瀬戸大橋5 P緩衝工の調査	山中鷹志 …… No.31	1984. 10
南北備讃瀬戸大橋4A・7Aケーブルアンカーフレームの一括設計	栗原敏広・吉川章三 …… No.31	1984. 10
南北備讃瀬戸大橋1 Aアンカレイジの施工	加島 聰・森谷俊美・徳永剛平 …… No.32	1985. 1
南北備讃瀬戸大橋4 A供用アンカレイジの設計	馬場賢三 …… No.32	1985. 1
南北備讃瀬戸大橋 (上部工) の基本設計	森本隆也・馬場賢三 …… No.33	1985. 4
北備讃瀬戸大橋塔製作	成井 信・平野 茂・古家和彦 …… No.33	1985. 4
北備讃瀬戸大橋ケーブルサドルの製作	成井 信・平野 茂・古家和彦 …… No.34	1985. 7
北備讃瀬戸大橋塔架設工事	成井 信・平野 茂・古家和彦 …… No.35	1985. 10
南北備讃瀬戸大橋4 Aアンカレイジの施工	山中鷹志・栗原敏広 …… No.35	1985. 10
南北備讃瀬戸大橋の耐風性 (その1)	成井 信 …… No.37	1986. 1
南北備讃瀬戸大橋の耐風性 (その2)	成井 信 …… No.38	1986. 4
南北備讃瀬戸大橋塔製作・架設	山中鷹志・林 義信・金崎智樹 …… No.39	1986. 7
南北備讃瀬戸大橋補剛桁の溶接施工性試験	成井 信・平野 茂・古家和彦 …… No.39	1986. 7
南北備讃瀬戸大橋7 Aアンカレイジの施工	高木 浩 …… No.40	1986. 10
南北備讃瀬戸大橋補剛桁の溶接施工性試験 (第二報)	成井 信 …… No.41	1987. 1
南北備讃瀬戸大橋補剛桁の詳細設計	成井 信 …… No.42	1987. 4
南北備讃瀬戸大橋のケーブル架設工事	神 弘夫・奥田 基・梶尾光邦 …… No.43	1987. 7
北備讃瀬戸大橋道路伸縮装置の設計・製作	成井 信 …… No.44	1987. 10
北備讃瀬戸大橋緩衝桁軌道伸縮装置の製作	成井 信 …… No.44	1987. 10
北備讃瀬戸大橋補剛桁架設工事	成井 信 …… No.45	1988. 1
自動超音波探傷システムを用いた北備讃瀬戸大橋補剛桁部材検査	成井 信 …… No.47	1988. 7
南備讃瀬戸大橋補剛桁架設工事	奥田 基 …… No.47	1988. 7
グースアスファルト舗装時における鋼床版の挙動	奥田 基 …… No.48	1988. 10
南北備讃瀬戸大橋上屋工事	北川 信・長谷川芳己 …… No.49	1989. 1
南備讃瀬戸大橋振動実験	奥田 基・大川宗男 …… No.49	1989. 1
南備讃瀬戸大橋緩衝工	奥田 基 …… No.49	1989. 1
南備讃瀬戸大橋の橋体精密点検	林 義信・池田定三・中西 治 …… No.80	1996. 10
北備讃瀬戸大橋ケーブル送気試験	奥田 基・山下五月・伊香賀信文 …… No.82	1997. 4
北備讃瀬戸大橋緩衝工の改良	長谷川芳己・杉本 健 …… No.98	2002. 3
共用アンカレイジスプレー室内の除湿効率改善	北村岳伸・竹口昌弘・三坂誠己 …… No.124	2015. 3

・番の州高架橋

番の州高架橋基礎杭試験 (その1)	山本紀夫・兼田和弘 …… No.5	1978. 7
番の州高架橋基礎杭試験 (その2)	山本紀夫・兼田和弘 …… No.6	1978. 10
番の州高架橋下部工設計	樋口康三 …… No.23	1983. 1
番の州高架橋リバース杭施工報告	大田 享 …… No.23	1983. 1
番の州高架橋下部工の施工	岸 寛・河端哲郎 …… No.37	1986. 1
番の州高架橋トラスの設計・製作	高木 浩 …… No.42	1987. 4
番の州高架橋鉄道桁の施工	松田大六・大坪正行・山岸 明 …… No.44	1987. 10
番の州高架橋トラスの架設	松田大六 …… No.48	1988. 10
番の州高架橋鋼箱桁の架設	松田大六 …… No.48	1988. 10

・上記以外の橋梁

北浦港橋梁の設計	松田大六・大坪正行・山岸 明 …… No.39	1986. 7
----------	-------------------------	---------

阿津川橋梁上部工の施工	寺坂典正・佐藤真太郎・磯井祥二……	No.42	1987. 4
塩生橋下部工工事	卜部孝夫・成瀬善果……………	No.43	1987. 7
北浦港橋梁下部工の施工	松田大六・大坪正行・山岸 明……	No.43	1987. 7
岸ノ上高架橋PC上部工の設計・施工	藤井周志・角 和夫……………	No.45	1988. 1
塩生橋上部工の設計・施工	藤井周志・角 和夫……………	No.47	1988. 7
北浦港橋梁上部工の施工	松田大六……………	No.47	1988. 7
鋼床版への高機能舗装の試験施工	有馬敬育……………	No.118	2012. 3
・その他			
児島～坂出ルート海峡部地質調査（その1）	山縣 守……………	No.3	1978. 1
児島～坂出ルート海峡部地質調査（その2）	山縣 守……………	No.4	1978. 1
鷺羽山の地質調査	宮下 力・江藤隆男・田村 隆……	No.12	1980. 4
鷺羽山トンネル構造形式検討	藤井周志……………	No.16	1981. 4
鷺羽山地区運搬用坑道の計測結果	呉藤 満・藤井周志・富田大造……	No.19	1982. 1
本四備讃線の電気設備	吉田昌弘……………	No.23	1983. 1
鷺羽山トンネルの施工	長谷川滋・佐藤正人……………	No.35	1985. 10
下村トンネルの施工と計測	福代博志……………	No.37	1986. 1
早島IC軟弱地盤対策	城野治三郎・天野弘也……………	No.39	1986. 7
神道山地区工事	藤井秀夫……………	No.41	1987. 1
蟻峰山及び福南山両トンネルの施工	菊池浩一・萬藤博志・栗野純孝……	No.42	1988. 4
児島～坂出ルート吊橋ハンガーブラケット疲労試験	鳥海隆一……………	No.47	1988. 7
本四備讃線供用部の軌道工事の施工	山岸 明・真鍋秀志……………	No.48	1988. 10
児島～坂出ルート橋梁点検補修用作業車	久保田良司……………	No.49	1989. 1
与島PA上下水道設備	伊藤六兵衛・岩崎洋二……………	No.49	1989. 1
瀬戸中央自動車道の遠隔監視制御システム	西野盛雄・笠松邦安・山見一馬……	No.50	1989. 4
瀬戸中央自動車道の道路管理用機械設備	久保田良司・古賀 昇……………	No.50	1989. 4
児島～坂出ルートにおける道路造園及び修景緑化	北 肇夫……………	No.50	1989. 4
瀬戸中央自動車道集中局（電気通信）設備	西野盛雄・田中俊雄・矢野 稔……	No.50	1989. 4
瀬戸中央自動車道の料金収受システム	土山正己・小笠原保……………	No.53	1990. 1
瀬戸大橋（吊橋・斜張橋）における列車走行試験	岩田充一・梶原博通……………	No.54	1990. 4
路面温度予測システム	森谷俊美・金子正猪……………	No.57	1991. 1
瀬戸大橋の動態観測	岩屋勝司・武山哲郎・大川宗男……	No.57	1991. 1
瀬戸中央自動車道の開通以来の交通量動静分析	岡田凌太・宮下正之……………	No.77	1996. 1
瀬戸中央道における雪氷予測の改良	土居雅彦・大麻 毅……………	No.77	1996. 1
瀬戸中央自動車道鴻ノ池SAの駐車場改良	佃 長次・磯井祥二・日高裕司……	No.78	1996. 4
リンク式伸縮装置の改良	林 義信・藤谷邦夫・佐伯成己……	No.79	1996. 7
瀬戸大橋の維持管理、十年（主な損傷とその補修について）	保田雅彦・松本 毅……………	No.85	1998. 1
「電着工法」による鋼製ケーソン防食	岩垣富春・岡本浩幸……………	No.95	2000. 12
高密度ポリエチレン管の亀裂防止対策	政田 潔・香川 晃……………	No.98	2002. 3
瀬戸中央自動車道交通管理システムの更新計画	大江慎一・中島国雄……………	No.100	2003. 3
塗装変状部の調査と分析	岡澤達男……………	No.100	2003. 3
舗装精密点検の分析と保全計画	川西芳則……………	No.102	2004. 3
共用後15年を経た海峡部長大橋郡の塗装の現況	石橋清美・門田整達……………	No.103	2004. 9
鋼製ケーソンの電着工法による防食の現況	寺下孝男・岡本浩幸……………	No.103	2004. 9
瀬戸中央自動車道（早島管内）伸縮装置の補修計画	金保 勉・高木 久……………	No.103	2004. 9
瀬戸大橋の橋面塗装の現況と補修	平井良樹・橋本 龍……………	No.105	2004. 9
ローリングリーブ横移動吸収板の想定外変位と固定ピンの破断	徳永剛平……………	No.106	2006. 3
瀬戸大橋の塗膜評価	長尾幸雄……………	No.106	2006. 3
瀬戸大橋ケーブル送気乾燥システムの改良とその効果	花井 拓・寺下孝男・熊井貴弘……	No.108	2007. 3
瀬戸大橋の維持管理	岡本泰臣……………	No.110	2008. 3

鋼ケーソン電着防食の防食性能	坂本佳也・大川宗男・宮口典博……	No.113	2009.9
瀬戸大橋トラス3橋段差防止工事	真辺保仁・平下忠一・大爺健司……	No.113	2009.9
瀬戸大橋の鋼ケーソン干満帯・飛沫帯の防食	宮口典博・大川宗男・坂本佳也……	No.115	2010.9
鋼床版裏面におけるスプレー塗装の試験施工	大爺健司・真辺保仁・籠池利弘……	No.116	2011.3
瀬戸大橋におけるコンクリート構造物の劣化対策	坂本佳也・大川宗男……	No.118	2012.3
瀬戸大橋のCCTVに求められる性能	日高英二・玉津和哉……	No.118	2012.3
瀬戸大橋伸縮装置セットボルトの腐食診断手法と腐食要因の推定	村井俊之・小林克己・大爺健司……	No.119	2012.9
瀬戸大橋スプレー室除湿設備の改善と効果	香川 晃……	No.120	2013.3
与島橋3径間部、番の州高架橋トラス部の耐震補強設計	福永 勸・河藤千尋・遠山直樹……	No.126	2016.3
瀬戸大橋ケーブル送気乾燥システムの改善経緯と今後の課題	門田整達・竹口昌弘……	No.127	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	西谷雅弘・河藤千尋……	No.128	2017.3
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	安部真理子・門田整達・遠藤和男……	No.128	2017.3
下津井瀬戸大橋PC桁部と櫃石島高架橋の耐震補強	西谷雅弘・橋本 龍・遠藤和男……	No.129	2017.9
瀬戸大橋の維持管理	福永 勸……	No.130	2018.3
瀬戸大橋吊橋のグレーチング閉塞に伴う耐風安定性検討	花井 拓・竹口昌弘・町田 陽……	No.130	2018.3
櫃石島高架橋トラス部、与島橋2径間部の耐震補強設計	西谷雅弘・田村 正・平山靖之……	No.130	2018.3

■尾道～今治ルート

・新尾道大橋

新尾道大橋の景観設計	武山哲郎……	No.79	1996.7
新尾道大橋の橋梁連続化の検討	鈴木周一・田口松義・大塚雅裕……	No.85	1998.5
新尾道大橋2P鋼管矢板締切工事	金子正猪……	No.89	1999.1
新尾道上部工の設計	森山 彰……	No.90	1999.4
新尾道大橋の上部工架設報告	小松原仁・金子正猪……	No.90	1999.4
新尾道大橋桁内除湿設備の最適運転の試み	廣田昭次・小島久邦・東 秀樹……	No.98	2002.3
新尾道大橋箱桁内除湿管理	末廣弘靖・吉丸直明・橋本 龍……	No.112	2009.3

・因島大橋

因島大橋アンカレイジ基礎地盤の確認	宮島圭司・村上憲司……	No.3	1978.1
因島大橋ケーブル施工性試験	林有一郎・中村 守……	No.5	1978.7
因島大橋下部工工事に使用した海砂の品質	平山純一……	No.7	1979.1
因島大橋及び大三島橋の塗装色の選定	吉川利治・阿部和智……	No.8	1979.4
因島大橋エンドリンクの設計	林有一郎・淵田政信……	No.8	1979.4
因島大橋下部工工事報告	竹内覚夫・平山純一……	No.10	1979.10
因島大橋ケーブルアンカーフレームの設計	林有一郎……	No.11	1980.1
因島大橋風洞試験	中村 守・岡野 哲……	No.14	1980.10
因島大橋塔工事施工報告	竹内覚夫・池田 博……	No.14	1980.10
因島大橋塔の製作	松崎 実・池田 博……	No.15	1981.1
因島大橋塔の振動観測	松崎 実・池田 博……	No.17	1981.7
因島大橋ケーブル製作	香川祐次……	No.18	1981.10
因島大橋ケーブル架設	香川祐次・平野信一……	No.20	1982.4
因島大橋補剛桁架設	香川祐次・平原伸幸……	No.25	1983.7
因島大橋の橋面舗装	岸本良孝・小林義弘……	No.29	1984.6
因島大橋の維持管理設備	第三建設局機械電気課……	No.29	1984.6
因島大橋上部工工事の回想	旭 一穂……	No.29	1984.6
因島大橋と関連区間の概要	松崎 実……	No.29	1984.6
因島大橋関連区間の陸上部工事	越智啓登……	No.29	1984.6

因島大橋の補剛桁閉合と架設時の形状測定・応力測定 ・振動測定	青野 宏	No.29	1984. 6
因島大橋アンカレイジ上屋工事報告	榎原房之助・池田 博	No.29	1984. 6
因島大橋のケーブル後期工事	香川祐次	No.29	1984. 6
点検補修用作業車を利用した因島大橋のメンテナンス	高橋 信・平野 茂・末広弘靖	No.41	1987. 1
因島大橋における塗装の維持管理報告	松井 勉・平野 茂・金子正猪	No.43	1987. 7
因島大橋の橋体形状測定とケーブルバンドボルト軸力調査	松井 勉・平野 茂・金子正猪	No.44	1987. 10
因島大橋塗膜調査	山本紀夫・古家和彦・杉山剛史	No.61	1992. 1
ケーブル被覆構造の評価とアンカレイジ内防食工法	石橋清美・簗戸喜一・橋本 龍	No.85	1998. 1
因島大橋関連区間の陸上部橋梁橋脚耐震補強工事	末廣弘靖・長友浩信	No.92	1999. 12
因島大橋の薄層舗装工事報告	田向和則	No.96	2001. 4
因島大橋ハンガーロープ開放調査について	前田泰男	No.97	2001. 8
因島大橋の鋼床版裏面塗膜調査	末廣弘靖・熊井貴弘	No.101	2003. 9
大粒径Asを用いた舗装改良工事	簗戸喜一	No.105	2005. 9
因島大橋ケーブルバンドボルトの再締め付けにおける軸力管理	岩垣富春・蔵森和生	No.106	2006. 3
因島大橋東高架橋の耐震補強計画（設計）	吉田茂司・真辺保仁・小河正次	No.108	2007. 3
因島大橋塗替塗装工事（主塔・ハンガーロープ）	森脇正生・吉丸直明・橋本 龍	No.112	2009. 3
免震支承と炭素繊維シート巻立てによる因島大橋東高架橋の耐震補強	橋本 龍・末廣弘靖・森脇正生	No.114	2010. 3
吊橋ハンガーロープ素地調整装置の試験施工	東 秀樹・花田正一・貴志友樹・山根 彰	No.116	2011. 3
・生口橋			
生口橋の計画と下部工設計	富岡 紘・天野弘也・仁木清貴	No.44	1987. 10
生口橋接合部実験報告	森 邦久・帆足博明・木村一也	No.49	1989. 1
生口橋基礎工におけるリーバス杭の施工	岡田凌太・岡本正美	No.52	1989. 10
生口橋下部工工事（締切～完成）	山本茂樹・竹本祐造	No.55	1990. 7
生口橋の耐震固定法と支承構造	山岸一彦・西本 聡	No.56	1990. 10
生口橋鋼桁の疲労に関する検討	山岸一彦・矢野保広	No.57	1991. 1
生口橋PC桁ケーブル定着部の設計	山岸一彦・西本 聡・矢野保広	No.58	1991. 4
生口橋主桁接合部の設計・施工	山岸一彦・西本 聡・矢野保広	No.58	1991. 4
生口橋の管理用電気通信施設	山中 清	No.61	1992. 1
生口橋塔独立時の同調液体型制振装置	藤原 亨	No.62	1992. 4
生口橋上部工の設計・製作（その1）	藤原 亨	No.63	1992. 7
生口橋照明設計	山中 清	No.63	1992. 7
生口橋上部工の設計・製作（その2）	藤原 亨	No.64	1992. 10
生口橋実橋振動実験	藤原 亨・玉越隆史	No.65	1993. 1
生口橋箱桁内の腐食環境調査	古家和彦・磯江 浩・大串弘幸	No.100	2003. 3
複合構造特性の生口橋維持管理	末廣弘靖・森脇正生	No.112	2009. 3
・大三島橋			
大三島橋下部工工事報告	榎波義幸	No.1	1977. 7
大三島橋のコンクリート	高須賀博一・福本英一郎	No.6	1978. 10
大三島橋及び因島大橋の塗装色の選定	吉川利治・阿部和智	No.8	1979. 4
大三島橋架設時の耐風対策	山岸一彦	No.9	1979. 7
大三島橋関連陸上部工事	日高誠一・神野隆義	No.9	1979. 7
大三島橋と関連区間の概要	大島 久	No.9	1979. 7
大三島橋の塗装	村上憲司	No.9	1979. 7
大三島橋関連維持管理施設の計画と施工	第三建設局機械課	No.9	1979. 7
大三島橋の床版と橋面舗装	山縣 守・福本英一郎	No.9	1979. 7

大三島橋載荷試験	村上憲司	No.10	1979. 10
大三島橋補剛板の座屈実験	吉田好孝	No.12	1980. 4
大三島橋鋼格子床版上の漏水防止対策	帆足博明・日高裕司	No.74	1995. 4
大三島橋の床版劣化と補修	山下五月・西山 傳	No.100	2003. 3
大三島橋床版の予防保全をめざした橋面舗装の改良	木村一也・中村哲也	No.112	2009. 3

・伯方・大島大橋

伯方・大島大橋岩盤試験	山縣 守	No.14	1980. 10
伯方・大島大橋岩盤試験解析	井上真三	No.18	1981. 10
伯方・大島大橋の橋梁形式選定	岩屋勝司	No.20	1982. 4
大島大橋上部工基本設計 (その1)	山田勝彦・正田伸二	No.28	1984. 4
大島大橋上部工基本設計 (その2)	山田勝彦・正田伸二	No.30	1984. 7
伯方・大島大橋下部工施工報告	重村公登・高島 豊	No.35	1985. 10
大島大橋塔の設計製作	谷中幸和	No.37	1986. 1
大島大橋塔架設工事	谷中幸和・福永 勸	No.40	1986. 10
伯方橋上部工の設計製作	谷中幸和・越智節雄	No.40	1986. 10
大島大橋ケーブルストランド架設工事	平野信一・平塚義久	No.44	1987. 10
大島大橋補剛桁ハンガーブラケットの疲労試験	谷中幸和・福永 勸	No.46	1988. 4
大島大橋補剛桁直下吊上げ工法	平野信一	No.46	1988. 4
大島大橋の耐風安定性	平塚義久	No.46	1988. 4
大島大橋補剛桁の製作・架設	福井幸夫・平野信一	No.46	1988. 4
伯方・大島大橋の開通	小川英信	No.46	1988. 4
伯方・大島大橋維持管理設備	吉本正徳・末宗仁吉	No.46	1988. 4
伯方・大島大橋の橋面舗装	日高裕司	No.46	1988. 4
伯方橋上部工の架設	越智節雄	No.46	1988. 4
伯方・大島大橋関連陸上部工事	高嶋 勉	No.46	1988. 4
大島大橋振動実験	平塚義久	No.48	1988. 10
大島大橋の橋体計測	栗原敏広	No.64	1992. 10
大島大橋箱桁内腐食環境調査	森 幸夫	No.96	2001. 4
大島大橋ケーブルバンドの維持管理	山田郁夫・森山 彰	No.112	2009. 3
大島大橋における橋面舗装の変状原因調査	中村哲也・石倉健治	No.116	2011. 3

・多々羅大橋

多々羅大橋海峡部地質調査	山本茂樹・小野下武・岡本正美	No.61	1992. 1
多々羅大橋全体耐荷力試験	藤井裕司・鳥海隆一	No.65	1993. 1
多々羅大橋大規模載荷試験	山田勝彦・山縣 守・山本茂樹	No.68	1993. 10
多々羅大橋ジャケット工法	成瀬善果	No.73	1995. 1
多々羅大橋塔完成時の耐風性	藤原 亨・森山 彰	No.74	1995. 4
斜張橋鋼床版の圧縮疲労強度	藤井裕司・大橋治一	No.76	1995. 10
多々羅大橋の下部工施工報告	成瀬善果	No.76	1995. 10
高密度電気探査法による水理地質調査	中元雄治	No.76	1995. 10
多々羅大橋の大型風洞試験 (第一報)	北川 信・鳥海隆一・勝地 弘	No.77	1996. 1
長大斜張橋鋼床版の圧縮強度の評価	大橋治一・大川宗男	No.78	1996. 4
多々羅大橋の景観設計	森山 彰	No.79	1996. 7
多々羅大橋ケーブル制振対策	藤原 亨・森山 彰	No.79	1996. 7
多々羅大橋主塔架設系の風洞試験	平原伸幸・森山 彰	No.80	1997. 1
多々羅大橋の大型風洞試験 (第2報) - 複雑な地形の中での ガスト応答について -	秋山晴樹・鳥海隆一・大谷康史	No.83	1997. 7
多々羅大橋上部工の架設 (第一報) - 塔架設および塔付き 桁大ブロック架設 -	平原伸幸	No.84	1997. 10

多々羅大橋上部工の実施設計	藤原 亨・森山 彰・川西直樹 ……	No.88	1998. 10
多々羅大橋上部工の架設 (第二報)	平原伸幸・村田知司 ……	No.88	1998. 10
—鋼桁及びケーブルの架設—			
多々羅大橋全体構造の安全性照査	大橋治一 ……	No.90	1999. 4
多々羅大橋高架橋鋼上部工の省力化検討報告	武藤禮布・横山 浩・石元靖二 ……	No.90	1999. 4
多々羅大橋の振動実験	河口浩二・森山 彰・真辺保仁・山口和範 ……	No.90	1999. 4
実橋振動実験による斜張橋ケーブルと主桁の連成振動の検証	山口和範 ……	No.96	2001. 4
多々羅大橋鉛直支承のすべり板改良	末廣弘靖・森脇正生 ……	No.111	2008. 9
多々羅大橋ケーブルの耐風性検証 (中間報告)	山田郁夫・楠原栄樹 ……	No.112	2009. 3
多々羅大橋鉛直支承すべり板補修	大西 諒・森脇正生 ……	No.122	2014. 3
・来島海峡大橋			
来島大橋海峡部地質調査	加島延行 ……	No.54	1990. 4
来島大橋原位置岩盤試験	毛利徳成・下村 稔・野間俊男 ……	No.55	1990. 7
来島大橋山留工試験	白石哲磨・平井良樹・井上仲男 ……	No.55	1990. 7
来島大橋の橋梁計画	片山英二・藤井裕司・荻原勝也 ……	No.56	1990. 1
来島大橋の耐震設計	山田勝彦・福永 勸 ……	No.57	1991. 1
来島大橋の設計地盤定数 (領家型風化花崗岩を対象として)	山田勝彦・福永 勸 ……	No.58	1991. 4
来島大橋主塔の耐風特性	大橋治一・楠原栄樹 ……	No.59	1991. 7
来島大橋上部工の耐震性	大橋治一・中村哲也 ……	No.62	1992. 4
来島大橋補剛桁の耐風性	大橋治一 ……	No.65	1993. 1
来島大橋建設工事用海底ケーブルの敷設	中島国雄・矢野 稔 ……	No.67	1993. 7
来島大橋下部工の設計概要	森 邦久・山田郁夫 ……	No.69	1994. 1
来島大橋5Pケーソンの電気防食	高城信彦・金保 勉・清見博英 ……	No.69	1994. 1
来島大橋主塔の景観設計	大橋治一・磯江 浩 ……	No.70	1994. 4
来島大橋主塔の継手構造	大橋治一 ……	No.71	1994. 7
来島大橋主塔の耐風・耐震設計	大橋治一・山口和範 ……	No.72	1994. 1
来島大橋2P・9Pコンクリートケーソン設計・施工	富田大造・吉田茂司 ……	No.75	1995. 7
来島大橋6P・7A山留工 (鉄筋補強土工法) の設計・施工	伊藤稔明・金保 勉・遠藤和男 ……	No.79	1996. 7
来島大橋主塔架設時耐風対策	鈴木周一・佐々木雅敏・山口和範 ……	No.80	1996. 10
来島大橋10A高流動コンクリートの試験練り、現場施工 実験および実施工	吉川章三・鳥羽保行 ……	No.80	1996. 10
吊橋主塔の引張接合継手の製作架設	佐々木雅敏・宮口典博・山口和範 ……	No.82	1997. 4
来島大橋3P・5P・6P・8P主塔基礎の設計・施工	高城信彦・伊藤稔明・遠藤和男 ……	No.83	1997. 7
来島大橋4A・7Aケーブルアンカーフレームの設計・施工	伊藤稔明・五十嵐光徳・森 敦郎 ……	No.84	1997. 10
来島大橋ハンガー・バンドの設計	平野信一・麓興一郎・薄井稔弘 ……	No.85	1998. 1
来島大橋大型風洞試験報告	古屋信明・鳥海隆一・竹口昌弘 ……	No.88	1998. 10
来島海峡大橋ケーブル製作・架設工事報告	平野信一 ……	No.91	1999. 7
来島海峡大橋補剛桁架設	伊藤進一郎・大谷康史 ……	No.91	1999. 7
来島海峡大橋10Aトンネルアンカレイジ工事報告	吉川章三 ……	No.91	1999. 7
来島海峡大橋馬島高架部鋼上部工の設計・施工	伊藤稔明・祖父江泰孝 ……	No.91	1999. 7
来島海峡大橋補剛桁の設計・製作	伊藤進一郎 ……	No.93	2000. 4
来島海峡大橋の鋼床版舗装の設計・施工報告	伊藤稔明・日高裕司 ……	No.94	2000. 8
来島海峡大橋南高架橋の図面にない溶接線に係わる 現地調査と対策	斎藤哲男・大塚雅裕・田中輝良 ……	No.104	2005. 3
実橋における工場板継ぎ溶接の品質の調査と考察	帆足博明・森山彰・大塚雅裕・田中輝良 ……	No.104	2005. 3
来島海峡大橋ケーブル送気システムによる防錆対策の評価	田向和則・横井芳輝・朝倉義博 ……	No.112	2009. 3
来島海峡大橋鋼製ケーソン電気防食の現況調査	田向和則・川上明彦・横井芳輝 ……	No.117	2011. 9

来島海峡大橋ケーブル送気設備の改善と効果	松葉真人・小野祥史……………	No.119	2012. 9
来島海峡大橋送水管添架	梶尾光邦・大浦義司・高橋厚志 ……	No.123	2014. 9
来島海峡第一大橋のセンターステイロッド破断の原因究明と対応	小河正次・梶尾光邦・溝上善昭 ……	No.125	2015. 9
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 ……	No.128	2017. 3
・その他			
道路のり面の植生試験	重村公登……………	No.3	1978. 1
岩塊を使用した高盛土の施工	槇原房之助・山中鷹志・芹川省三 ……	No.17	1981. 7
宮窪トンネルの計測管理	有田 稔・中村富二夫・平塚義久 ……	No.38	1986. 4
宮窪トンネルの施工	有田 稔・中村富二夫・平塚義久 ……	No.42	1987. 4
尾道大橋橋体点検	上原靖視・杉山剛史……………	No.53	1990. 1
尾道大橋塗装工事	上原靖視・古家和彦・杉山剛史 ……	No.61	1992. 1
尾道大橋塗装工事（その2）	古家和彦・杉山剛史……………	No.66	1993. 4
多々羅大橋・来島大橋船舶緩衝工の設計	河口浩二・森山 彰……………	No.89	1999. 1
西瀬戸自動車道の電気通信設備計画-交通管理施設の節減-	中島国雄・石川信人・明野晃治 ……	No.90	1999. 4
多々羅大橋・新尾道大橋の橋面舗装	小松原仁・金子正猪・真辺保仁 ……	No.90	1999. 4
自航台船の開発	瀧下健二・亀井敏行・中村 修 ……	No.91	1999. 7
西瀬戸自動車道の維持管理用機械設備	田上幸雄・小林晃市・大崎弘道 ……	No.91	1999. 7
曲線を持つ連続PC箱桁の押出し架設-下田水高架橋	若月 豊・川端 淳……………	No.91	1999. 7
PC上部工工事報告-			
小浦高架橋工事報告	村卸靖訓・加藤嘉朗……………	No.91	1999. 7
尾道小橋の補修改良検討及び工事報告	末廣弘靖・中村哲也……………	No.92	1999. 12
陸上部橋梁の電気防食工事	杉山剛史……………	No.97	2001. 8
芸予地震における多々羅大橋西高架橋横異動制限装置の挙動	古家和彦・磯江 浩・森 幸夫 ……	No.98	2002. 3
芸予地震における海峡部橋梁の被災復旧状況及び橋体の挙動	古家和彦・磯江 浩・森 幸夫 ……	No.99	2002. 9
阿方高架橋すべりゴム支承の変状と対策	藤田 太……………	No.107	2006. 9
西瀬戸自動車道の維持管理	毛利徳成……………	No.112	2009. 3
しまなみ尾道管理センターでの長大橋の維持管理	吉川章三……………	No.112	2009. 3
西瀬戸自動車道（瀬戸内しまなみ海道）・愛媛県区間の維持管理	平原伸幸……………	No.112	2009. 3
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・小河正次 ……………	No.128	2017. 3

■長大橋技術センター アニュアルレポート

新材料を活用した橋梁付属物の検討（FRP製橋梁管理路の適用性検討）	荻原勝也・森下尊久……………	No.113	2009. 9
鋼橋の疲労に関する検討	山田郁夫・森山 彰・山口和範 ……	No.113	2009. 9
ケーブルバンドすべり安全性の検討	山田郁夫・森山 彰・山口和範 ……	No.113	2009. 9
円形断面ケーブルの制振対策検討	福永 勸・楠原栄樹……………	No.113	2009. 9
海峡部橋梁の耐震補強検討	福永 勸・竹口昌弘・遠藤和男 ……	No.113	2009. 9
新材料を活用した橋梁付属物の検討	荻原勝也・森下尊久……………	No.115	2010. 9
円形ケーブルの制振対策検討	福永 勸・楠原栄樹……………	No.115	2010. 9
門崎高架橋の動態観測結果報告	福永 勸・竹口昌弘・遠藤和男 ……	No.115	2010. 9
耐震性能評価用大規模地震動の設定（瀬戸大橋）	福永 勸・竹口昌弘・遠藤和男 ……	No.115	2010. 9
海峡部橋梁の耐震補強検討	福永 勸・竹口昌弘・遠藤和男 ……	No.115	2010. 9
鋼橋の疲労に関する検討	山田郁夫・山口和範・川端 淳 ……	No.115	2010. 9
ケーブルバンドすべり安全性の検討	山田郁夫・山口和範・川端 淳 ……	No.115	2010. 9

塗膜劣化の面的評価方法検討	荻原勝也・森下尊久……………	No.117	2011.9
明石海峡大橋主塔の制振対策再評価	福永 勸・角 和夫・竹口昌弘 ……	No.117	2011.9
瀬戸大橋の耐震補強検討	福永 勸・角 和夫・遠藤和男 ……	No.117	2011.9
画像を用いた点検手法の適用性検討	伊藤進一郎・川端 淳・池田秀継…	No.117	2011.9
鞍掛け方式ケーブルバンドのすべり安全性の検討	伊藤進一郎・川端 淳・池田秀継…	No.117	2011.9
マスコンクリート塗装の健全度調査	荻原勝也・古村 学・花井 拓 ……	No.119	2012.9
動態観測の成果と更新計画	福永 勸……………	No.119	2012.9
明石海峡大橋主塔の制振対策再評価	福永 勸・竹口昌弘……………	No.119	2012.9
赤外線サーモグラフィ法による疲労亀裂の検出	小林義弘・川端 淳・溝上善昭 ……	No.119	2012.9
工業用内視鏡の狭隘部の点検への適用性検討	小林義弘・川端 淳・溝上善昭 ……	No.119	2012.9
主塔内防食手法の検討	荻原勝也・竹内政彦……………	No.121	2013.9
本四陸上部橋梁の耐震補強検討	福永 勸・竹口昌弘・河藤千尋 ……	No.121	2013.9
疲労対策への取組 (疲労対策チーム活動)	小林義弘……………	No.121	2013.9
無機ジンクリッチペイント劣化に関する調査	荻原勝也・大塚雅裕……………	No.123	2014.9
瀬戸大橋PC橋の耐震対策検討	福永 勸・河藤千尋・竹口昌弘 ……	No.123	2014.9
瀬戸大橋吊橋鋼床板横リブひずみ計測	梁取直樹・溝上善昭……………	No.123	2014.9
瀬戸大橋トラス橋の耐震対策	福永 勸・河藤千尋……………	No.125	2015.9
表面保護工によるコンクリート内部含水率の変化	楠原栄樹・山根 彰……………	No.125	2015.9
鋼床板支点部ウェブギャップ板のまわし溶接部に発生した亀裂の補修検討	藤城忠朗……………	No.125	2015.9

■技術開発年次報告

技術開発と保全技術交流会議	荻原勝也・西谷雅弘……………	No.127	2016.9
防食分科会 塗装(鋼)WGの取組	楠原栄樹・竹口昌弘・久米昌夫 ……	No.127	2016.9
防食分科会 コンクリート保護工WGの取組	楠原栄樹・山根 彰……………	No.127	2016.9
防食分科会 海中基礎防食WGの取組	竹口昌弘・楠原栄樹……………	No.127	2016.9
防食分科会 ケーブル送気WGの取組	岡本 豊・大浦義司……………	No.127	2016.9
疲労分科会の取組	溝上善昭・森山 彰……………	No.127	2016.9
耐震分科会の取組	西谷雅弘・川藤千尋……………	No.127	2016.9
点検分科会 点検技術WGの取組	花井 拓・森山 彰……………	No.127	2016.9
防食分科会塗装(鋼)WGの取組	竹口昌弘・貴志友基・久米昌夫 ……	No.129	2017.9
防食分科会 海中基礎防食WGの取組	竹口昌弘・岡本 豊……………	No.129	2017.9
防食分科会 橋梁付属物WGの取組	竹口昌弘・岡本 豊……………	No.129	2017.9
疲労分科会の取組	林 昌弘・森山 彰……………	No.129	2017.9
耐風分科会の取組	楠原栄樹・花井 拓……………	No.129	2017.9
耐震分科会の取組	西谷雅弘・川藤千尋……………	No.129	2017.9

■海外報告

欧米長大橋視察報告 (1)	多田安夫・松崎 実……………	No.8	1979.4
欧米長大橋視察報告 (2)	多田安夫……………	No.10	1979.10
第50回IABSEシンポジウムに参加して	旭 一穂……………	No.11	1980.1
欧州レーダ対策視察報告	北風 潔……………	No.13	1980.7
米国の航行安全に関する調査報告	小川英信……………	No.16	1981.4
Humbert 橋訪問記	奥川淳志……………	No.24	1983.4
オーストラリアの橋梁	辰巳正明・山縣 守……………	No.27	1984.1
UJNR・橋梁ワークショップの報告	秋山晴樹……………	No.48	1988.10

アメリカ土木学会発表報告	辰巳正明	No.49	1989. 1
第6回日中道路交流会議報告	山根哲雄	No.50	1989. 4
北欧5カ国の国際橋梁会議“B r i d g e 8 8”	加島 聰	No.51	1989. 7
第11回IRF世界道路会議報告	飯島武明・秦 健作	No.52	1989. 10
米国長大橋の維持管理	藤井秀夫	No.53	1990. 1
ヨーロッパの長大橋調査—橋梁計画と景観設計について	馬場賢三・吉田好孝・原崎郁夫	No.54	1990. 4
ロマブリータ地震調査報告	辰巳正明	No.55	1990. 7
イラン国際橋梁会議報告	北川 信	No.55	1990. 7
ノルマンディー橋の近況	奥川淳志・原崎郁夫	No.56	1990. 10
第二回海峡部横断シンポジウム	吉田 修	No.56	1990. 10
ホンジュラス国を訪ねて	有田 稔	No.57	1991. 1
平成2年度海外調査団報告	高木 浩	No.58	1991. 4
中国への橋梁技術協力	田島照義	No.59	1991. 7
チュニジアを訪ねて	森谷俊美	No.60	1991. 10
米国の道路関連事業に関する調査報告	谷中幸和	No.61	1992. 1
I A B S E出張報告	松本弘輝	No.62	1992. 4
ネパールでの基本計画調査報告	山縣 守	No.63	1992. 7
中国の幹線道路網計画	毛利徳成	No.64	1992. 10
トルコでの有料道路セミナー報告	吉川章三	No.65	1993. 1
インドネシア4島連結計画	河口浩二	No.66	1993. 4
ニカラグアを訪ねて	山中鷹志	No.67	1993. 7
厦門西通道橋梁建設計画	高澤 勤	No.68	1993. 10
内戦終結後のエル・サルバドルを訪ねて	越智啓登	No.69	1994. 1
発展途上国での橋梁技術指導に関する一考案 (ケニア共和国での勤務経験から)	栗野純孝	No.70	1994. 4
ノースリッジ地震調査報告	吉田好孝	No.70	1994. 4
インド国ボンベイ市を訪ねて	中村 守	No.71	1994. 7
ニューヨーク市橋梁リハビリテーション視察報告	古家和彦	No.72	1994. 10
インドネシアと私(雑感)	奥田 基	No.73	1995. 1
ミンダナオ島探訪記	金澤克義	No.74	1995. 4
オマーンを訪ねて	高島 豊	No.74	1995. 4
トルコの道と橋	岡野 哲	No.75	1995. 7
スエズ運河に架ける	平原伸幸	No.75	1995. 7
エチオピア国にて	日里正夫	No.76	1995. 10
アメリカ留学報告	荻原勝也	No.76	1995. 10
新チョルテカ橋基本設計調査(ホンジュラス)	岡本泰臣	No.77	1996. 1
カンボジアのメコン河架橋計画	神 弘夫	No.78	1996. 4
モザンビーク国幹線道路橋再建計画基本設計調査	佃 長次	No.79	1996. 7
モロッコを訪問して	酒井和吉	No.80	1996. 10
アジアの橋梁の現状	栗野純孝	No.81	1997. 1
インドネシアの吊橋	松本 毅	No.81	1997. 1
鋼橋の耐震設計、評価、補修に関する米国の最近の情報 (セミナー報告)	秋山晴樹	No.82	1997. 4
タンザニア動物保護区における道路及び橋梁の建設・補修 工事の現状報告	藤田 太	No.82	1997. 4
スリ・ランカ国全国橋梁改修計画調査に参加して	山本茂樹	No.83	1997. 7
チリ国全国橋梁補修整備計画調査フェーズ2	長尾日出男	No.83	1997. 7
グレナダ国道路整備計画調査	佐野幸洋	No.84	1997. 10
ブータン王国を訪ねて	有田 稔	No.84	1997. 10
4月25日橋の鉄道載荷および車線拡幅に伴う改築工事	原崎郁夫・大橋治一	No.85	1998. 1

中南米道路調査の旅	徳永剛平	No.85	1998. 1
海外報告 (ベトナム)	加島延行	No.87	1998. 7
ザンビア・ジンバブエ国チルド橋の建設計画調査	吉田好孝	No.87	1998. 7
オープングレーチング床版を用いた橋梁の調査	仁木清貴	No.88	1998. 10
デンマーク・スウェーデンの海峡連絡路ーグレートベルト	鳥海隆一	No.88	1998. 10
橋、オーレスン海峡連絡路ー			
エチオピア国橋梁現況調査	長尾日出男	No.89	1999. 1
海外報告 (サウディ・アラビア王国)	山田和彦	No.89	1999. 1
パラオ国新KB橋建設計画	村田正信	No.90	1999. 4
マラウイ国マンゴチ道路橋架替計画調査	山岸一彦	No.90	1999. 4
マレーシアの道路と橋	高城信彦	No.91	1999. 7
海外報告 (トルコ共和国)	川上賢明	No.91	1999. 7
海外でのBOT事業	佃 長次	No.92	1999. 12
エジプト報告	新田篤志	No.92	1999. 12
海外報告 (ジンバブエ) ヴィクトリアフォールズ橋	飯塚力也	No.93	2000. 4
日本・ペルー友好橋建設計画	天野耕一	No.93	2000. 4
第2回国際吊橋管理者会議報告	川上賢明	No.94	2000. 8
ジブラルタル海峡横断路構想の現状	星野 満	No.94	2000. 8
海外報告 (ジンバブエ) 新チルド橋の建設	飯塚力也	No.94	2000. 8
トルコ地震による道路施設の被害	帆足博明	No.94	2000. 8
海外報告 (バングラデシュ)	大川宗男	No.94	2000. 8
海外報告 (ラオス)	高城信彦	No.96	2001. 4
海外報告 (ザンビア共和国)	竹内政彦	No.96	2001. 4
海外報告 (エチオピア)	長尾日出男	No.97	2001. 8
海外報告 (エジプト) スエズ運河連絡橋	金沢克義	No.97	2001. 8
海外報告 (ケニア)	徳永剛平	No.98	2002. 3
海外報告 (ミャンマー)	大川宗男	No.98	2002. 3
海外報告 (マレーシア、橋には花が咲き乱れ)	吉田好孝	No.100	2003. 3
海外報告 (フィリピン橋梁事情)	奥田 基	No.100	2003. 3
海外報告 (雷龍の国ブータン橋梁事情)	佐々木政敏	No.101	2003. 9
海外報告 (トルコ報告)	新田篤志	No.101	2003. 9
海外報告 (シバの女王の国エチオピア便り)	林 昌弘	No.102	2004. 3
海外報告 (バングラデシュの道路及び橋事情)	塚原 修	No.102	2004. 3
海外報告 (カンボジア)	大川宗男	No.102	2004. 3
海外報告 (フィリピンの鋼橋の品質管理・維持に関して)	栗野純孝	No.103	2004. 9
海外報告 (ケニア共和国における道路維持管理プロジェクト)	竹内政彦	No.103	2004. 9
海外報告 (エチオピア/新青ナイル橋計画)	林 昌弘	No.104	2005. 3
海外報告 (東ティモール国の道路分野概要)	上村博文	No.105	2005. 9
海外報告 (トルコ事情)	松本 毅	No.106	2006. 3
海外報告 (バングラデシュ事情)	西谷雅弘	No.107	2006. 9
海外報告 (インド)	森山 彰	No.107	2006. 9
海外報告 (エチオピア)	石原和幸	No.108	2007. 3
海外報告 (ケニア)	荻原勝也	No.109	2007. 9
海外報告 (バングラデシュ)	栗原敏広	No.111	2008. 9
海外報告 (フィリピン国)	長尾日出男	No.113	2009. 9
海外報告 (エチオピア)	高城信彦	No.114	2010. 3
海外報告 (コンゴマタディ橋の現況)	荻原勝也	No.115	2010. 9
海外報告 (インドネシアの道路事情)	塚原 修	No.116	2011. 3
海外報告 (ミャンマーの橋梁)	高木 浩	No.116	2011. 3
海外報告 (エジプト橋梁維持管理能力向上プロジェクト)	川上賢明	No.117	2011. 9

詳細計画策定調査)

海外報告 (ベトナムニャットン橋の現況について)	上村博文	No.117	2011. 9
海外報告 (ケニアの道路維持管理行政)	梁取直樹	No.118	2012. 3
海外報告 (バングラデシュの道路・橋梁事情)	伊藤豊秋	No.119	2012. 9
海外報告 (カザフスタンイルティシュ川橋梁維持管理支援)	遠藤和男	No.120	2013. 3
マタディ橋維持管理能力向上プロジェクト	竹内政彦	No.121	2013. 9
海外報告(エジプト国橋梁維持管理能力向上プロジェクト)	大川宗男	No.122	2014. 3
海外報告(ケニア国道路メンテナンス業務の外部委託化に 関する監理能力強化プロジェクト(フェーズ2))	池田秀継	No.123	2014. 9
海外報告(米国橋梁安全点検講習)	梁取直樹	No.124	2015. 3
ケニア国道路維持管理プロジェクト	池田秀継	No.127	2016. 9
トルコ オスマン・ガジ橋	西谷雅弘	No.127	2016. 9
コンゴ民主共和国	貴志友基・藤田憲二	No.130	2018. 3

■講演会等

ニューヨーク市での経験に基づく橋梁の維持管理システム	Bojidars Yanev	No.92	1999. 12
国際化の中での技術とその課題	日下部治	No.93	2000. 4
道路橋の最適保全計画	Dan M. Frangopol	No.94	2000. 8
アジア大洋州橋梁交流フォーラム開催報告	酒井和吉	No.95	2000. 12
第3回国際吊橋管理者会議報告	吉川章三・鈴木周一・伊藤豊秋	No.99	2002. 9

■インタビュー

道路橋示方書の改訂作業への取り組み	西川和廣	No.92	1999. 12
-------------------	------	-------	----------

本四技報編集委員会・幹事会名簿(五十音順)平成30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
	磯江浩生		池田秀繼
	白田幸史		薄井稔弘
	大谷康史		岡本昌夫
	梶尾光邦		久米直城
	貴志友基		敷地直文
	古村学彦		大東久策
	竹内政弘		高寺嶋賢
	竹口昌弘		遠山直樹
	西林昌弘		中川秋男
	村田知司		花井拓二
	山口和範		藤田憲昭
	吉本紀一		溝上善夫
			森山幸樹
			弓山茂樹

本四技報 第130号

発行 平成30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>



古紙/PLP配合率70%再生紙を使用

