

本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.42 No.129 2017.9

本州四国連絡高速道路株式会社編集

EDITED BY HONSHU-SHIKOKU BRIDGE EXPRESSWAY COMPANY LIMITED

本四技報 第 129 号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.129

【巻頭言】

- 保全事業も AI で超効率化 川上 賢明... 1
Enhance Efficiency of Maintenance Activity with AI

【技術論文】

- 技術開発計画（H26-H28）の成果 荻原勝也・西谷雅弘... 2
Outcomes of Technological Development Project between 2014 and 2016
- 海峡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...18
Revision of Guideline for Coating of Mass Concrete Structure of Long-Span Bridge
- 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...25
Empirical Studies of Spatial & Economic Effect of Utilizing the Honshu-Shikoku Bridge Based on Inter-Regional Input-Output Tables
- 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...33
Behavior of the bearings of the Magosaki Viaduct before and after the rehabilitation
- 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...41
Seismic Retrofit for PC-girders at Both Ends of Shimotsu-Seto Bridge and Hitsuishijima Viaduct

【技術開発年次報告】

- 防食分科会塗装（鋼）WG の取組 竹口昌弘・貴志友基・久米昌夫...53
Report of Working Group for Metal Coating System, Anticorrosion Subcommittee
- 防食分科会 海中基礎防食 WG の取組 竹口昌弘・岡本 豊...54
Report of Working Group for anticorrosion for underwater foundations, Anticorrosion Subcommittee
- 防食分科会 橋梁付属物 WG の取組 竹口昌弘・岡本 豊...55
Report of Working Group for bridge accessories, Anticorrosion Subcommittee
- 疲労分科会の取組 林 昌弘・森山 彰...56
Report of Fatigue Subcommittee
- 耐震分科会の取組 西谷雅弘・河藤千尋...58
Report of Seismic Subcommittee
- 耐風分科会の取組 楠原栄樹・花井 拓...60
Report of Wind-Resistance Subcommittee

【技術ニュース】

- 韓国 NAH 社との技術交流 西谷雅弘...61
Technical information exchange with NAH, Korea
- 第 15 回 REAAA 道路会議（インドネシア） 坂本佳也...62
15th REAAA Road Conference, Indonesia
- 斜張橋耐震固定装置用ばねのばね技術遺産認定 大谷康史...63
Recognition of the spring of aseismatic facilities for cable-stayed bridges as Spring technological heritage

【文献紹介】

- 本州四国連絡橋関連技術文献紹介 64
Technical articles related to Honshu-Shikoku Bridges
-

孫崎高架橋支承補修に伴う挙動調査

Behavior of the bearings of the Magosaki Viaduct before and after the rehabilitation



写真-1 支承補修箇所全景

Photo 1 Full view of bearing rehabilitation



写真-2 ジャッキアップ状況

Photo 2 Jacking up the girder for bearing rehabilitation

下津井瀬戸大橋 P C 桁部と櫃石島高架橋の耐震補強

Seismic Retrofit for PC-girders at Both Ends of Shimotsu-Seto Bridge and Hitsuishijima Viaduct



写真－3 下津井瀬戸大橋 PC 桁部の耐震補強

Photo 3 Seismic retrofit for PC-girders at an end of Simotsui-Seto Bridge



写真－4 櫃石島高架橋の耐震補強

Photo 4 Seismic retrofit for PC-girders at Hitsuishijima Viaduct

保全事業も AI で超効率化

Enhance Efficiency of Maintenance Activity with AI

執行役員 保全部長 川上 賢明

Yoshiaki kawakami

はじめに

我社は現在、「信頼と挑戦」を基本として200年以上の長期にわたりご利用いただけるよう長大橋をはじめとする道路構造物の維持管理に努めているところである。その中枢を担う技術開発とその高度化については、インフラメントにとどまることなくイノベーション的な生産性を一層飛躍させることが今後は必要となる。

ここでは社会生活と経済活動を縁の下で支える土木・建築や車の自動運転から医療、囲碁・将棋に至るまで何かと最近話題になっているAI（人工知能）にスポットをあて、今後それを活用できる保全事業との関連について触れたいと思う。

AI技術の活用のすすめ

ここ何年、建設分野に人が来なくなっているように今後少子化が更に進行することで、労働力不足が深刻化することは目に見えている。そのリソースをどのように確保していけばよいかの切り札の一つに、AI技術の活用があると考えられる。基本的には省人化、省力化の技術であり、人から業務が代替えられるものである。職業の特徴からAIに判定させると代替の可能性がある職業の中に一般事務を含め、建設作業、機械木工及び電気通信技術なども含まれており、技術職も多くあがっていることから、我々も一定の危機感がある。一方、代替の可能性がある低い職業は、教員・研究者、医者や芸術家などであったそうである。

高速道路でもETCが広く普及したように、人による多くの作業が既に自動化されている。AIが示すように技術的に自動化しやすいものは、単純労働やルーチンワークの多い定型的な業務であり、創造性が必要であったり、独創性があり芸術性があるものは不向きである。また、他者とコミュニケーション能力が必要な協調や説得したり交渉することも困難である。このことから付加価値の低い業務はAIに任せ、その空いた時間と労力をより付加価値の高い業務に移行することができるようになり、これまでお客様に難しかったサービスを提供できるような新たな業務内容に拡張できるよい機会になるのではないかと考えている。

AIと技術者による診断

行動計画 2017-2018にも記載しているが、「点検技術の高度化」の一環として、ドローン（小型無人飛行機）

は淡路島中央SICでも工事の進捗状況の確認に実際使用している他、災害応急対策の被災状況の迅速な把握等にも非常に有効である。現在、構造物の点検などこれらの更なる可能性を検討しているところであるが、これにAI技術を付加してやれば点検後の診断にも非常に有効となるものと考えられる。

既に医療分野では健康診断の画像診断をアシストするツールとして、医師とAIを組み合わせてAIが異常と診断したものだけを見るようにすれば、10倍の速度で識別できるそうである。これと同様に維持管理の分野では、とりわけ進んでいる舗装の点検は、ひび割れやポットホールをAIで検出し、劣化度をランク付けする路面の画像を大量に取込み、我々技術者による診断結果をセットにしたデータを「α基」がディープラーニングで学習したように、AI自身の「眼」を育てていけば、診断させることができるようになる。我々の現場では見た目をもとに材料の性状や構造物の品質、損傷状況などを判断する場面が多いことからこのような画像を利用した舗装の点検・診断が有効となる。

これからすると長大橋の塗替塗装にばく大な費用を費やしている我社にとっては、これら点検においても近接できるロボットに高画質のカメラを乗せ、我々技術者がその劣化度を判定し、それら取りまとめた多数のデータをAIに画像認識及び損傷状況の推定をさせ、活用できることが容易に分かる。このように診断結果や交通量など様々なデータから橋などの損傷の進行を推定し、補修時期や工法の決定を支援できるようにすることを既にある他会社も実践しようとしている。このように考えればAIは診断のみならず、建設・保全事業やインフラの領域では、今後かなり活躍できるということが分かる。

おわりに

これまでに触れたことを実践するには固い頭の持ち主である我々ではなく、柔軟な頭脳を持ったこれからの若手技術者に期待するところが大きい。

既に検討中である積算システム等を初めとするIT技術を推進させていく中で、AI技術を効果的に活用し、仕事の生産性向上・業務プロセスの再構築を実現するためのITプロジェクトチームの取組の一つに入れていただき、AI技術を活用した保全事業のさらなるイノベーションに向け、情熱をもって果敢に取り組んでいただきたいと思います。

技術開発計画（H26-H28）の成果

Outcomes of Technological Development Project between 2014 and 2016

荻原 勝也 Katsuya Ogihara

長大橋技術センター長

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

長大橋技術センター
総括・耐震グループリーダー

概要

当社は、長大橋の予防保全を実施するために必要となる技術の開発を目的として、平成26年度から3カ年にわたる計画を策定し、取り組んできた。本報告は、この3カ年における技術開発等の成果について報告するものである。また、引き続き実施する技術開発計画（H29-H31）の検討項目を紹介する。

Three-year technological development project was worked on to practice preventive maintenance for long-span bridges between 2014 and 2016. This paper reports outcomes from the three-year project. The following three-year project that started in 2017 is explained as well.

1. はじめに

当社は技術開発の第2期中期計画（技術開発計画H26-H28。以下「本計画」という。）を策定し、技術開発に体系的に取り組んできた。この報告は第2期の活動成果をまとめたものである。3カ年にわたる活動で、進捗をみたもの継続検討が必要となったものさまざまではあるが、現時点での到達点を概説する。平成29年度から、目標期間を同じく3カ年とした第3期の技術開発計画を策定し、引き続き技術開発の着実な進捗を図ることになっている。

2. 技術開発計画（H26-H28）

2.1 技術開発計画の目的

本州と四国を結ぶ3ルート、総延長約173kmの本州四国連絡高速道路（以下「本四高速道路」という。）は、昭和54年、大三島橋関連区間が供用した後、順次、供用区間が延長し、平成11年には全路線が供用した。平成30年には、神戸淡路鳴門自動車道が全通して20周年、瀬戸中央自動車道が30周年、その翌年には、西瀬戸自動車道が全通して20年を迎えることになる。長大橋を個別に見ると、供用年数の短いものでも約20年、長いものでは約40年を迎える時期になってきた。これまで、橋体そのものの安全性が損なわれるような事象は生じていないが、予防保全を基軸とした維持管理を着実に実施していくために、重要性を考慮しつつ検討項目を設定するとともに、点検手法の効率化や安全性の向上、塗装の長寿命化や塗

替塗装のさらなる効率化、耐風設計・耐震設計技術のさらなる高度化などさまざまな観点から開発目標を設定し、技術開発に取り組んできた。

200年以上の超長期にわたり長大橋の健全性を確保していくためには、予防保全を基本とする維持管理の実践が重要である。同時に、劣化予測の精度を向上させて、適切な時期に効率的な補修・補強を計画的に実施して、ライフサイクルコスト（LCC）を最小にするというアセットマネジメントを実践することも不可欠である。このような取組において必要とされるさまざまな技術を効率的にかつ効果的に開発するため、第1期技術開発計画（平成21年度～25年度）に続き、平成26年度から3年間を目標期間とした第2期技術開発計画を推進してきた。

2.2 技術開発の項目

技術開発の策定理念は、当社の経営理念の実現を基本とし、次のとおり設定した。

- ・お客様の安全性向上のための技術を開発する、
- ・環境に配慮した技術を開発する、
- ・200年以上の万全な維持管理のための技術を開発する、
- ・設計を検証するとともに維持管理コストを縮減する。

上記理念を考慮し、本計画で取り組む技術開発の項目を次のように設定した。分科会ごとに技術開発項目を次に列挙する。

○防食分科会

- ・上塗り塗膜の消耗劣化特性の評価による劣化曲線の見直し
- ・中塗り塗膜の耐久性の評価による塗装劣化モードの見

直し

- ・熱影響を受けない部位の無機ジンクリッチペイントの劣化原因の推定
- ・局部補修塗装仕様の策定
- ・主塔塗替塗装の施工法の検討
- ・環境負荷を低減する塗替塗装材料の性能評価
- ・マスコンクリート表面被覆要領における維持管理法の提案
- ・ASR対策として試験施工したコンクリート表面含浸工の性能評価
- ・鋼製海中基礎（海中部、飛沫帯部）に対する防食方法の提案
- ・ケーブル被覆方法の見直し
- ・送気システムの高度化
- ・ハンガーロープ管理マニュアルの更新
- ・鋼床版縦桁支承の高耐久化手法と亜鉛めっき部材の劣化度評価手法の提案
- ・点検と補修の範囲を拡大するための既存作業車の改造及び簡易足場の試験施工

○疲労分科会

- ・道路鉄道併用橋のAUTによる疲労亀裂調査法の立案
- ・赤外線サーモグラフィ（温度ギャップ法）による鋼床版疲労亀裂スクリーニング調査マニュアルの作成
- ・赤外線サーモグラフィ（熱弾性法）の疲労業務への適用性検討
- ・鋼床版デッキプレートとUリブ溶接部疲労亀裂の補修方法の確立

○耐震分科会

- ・対象橋梁の耐震補強工事用の設計図・施工計画の作成

○舗装分科会

- ・鋼床版舗装の局部補修方法の提案
- ・本四高速道路における舗装劣化予測モデルの作成

○点検分科会

- ・近接目視困難な高架橋張り出し床版部の剥落点検の合理化方策の確立
- ・ケーブルバンドボルト軸力（縦締め形式）管理マニュアルの作成
- ・点検・補修管理システム（JB-IRIS）の改良

○耐風分科会

- ・耐風安定性の再評価

3. 技術開発成果の概要

各検討項目ごとに、3カ年の成果等を以下に概説する。

3.1 上塗り塗膜の消耗劣化特性の評価による劣化曲線の見直し

塗替塗装には多くの時間と費用を要するため、精度の高い劣化予測手法を適用し、計画的に実施する必要がある。実橋における塗膜厚の分布を調査した結果、図-1

に示すようなバラツキが認められ、対数正規分布関数で近似できることが明らかとなった。

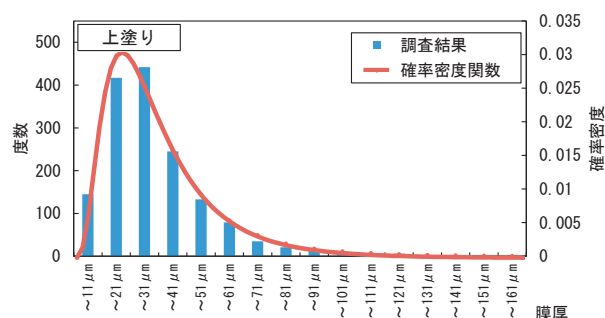


図-1 上塗り残存塗膜厚の分布（瀬戸大橋）

Fig.1 Distribution of remaining coating thickness (Seto-ohashi Bridges)

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¹⁾。開発した手法のイメージは図-2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。

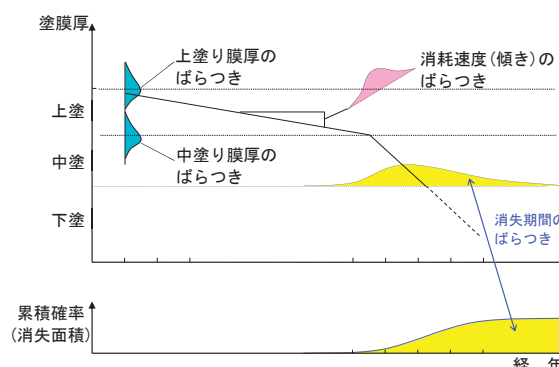


図-2 塗膜劣化予測のイメージ

Fig.2 Concept of coating degradation prediction

3.2 中塗り塗膜の耐久性の評価による塗装劣化モードの見直し

本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という。）に適用している重防食塗装系は、塗膜表面からの消耗特性を考慮した劣化予測により計画的な塗替塗装を実施している。しかしながら、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^{2) 3)}。その結果、以下の事項が明らかとなった。

- 1) 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。
- 2) 上塗り塗膜と中塗り塗膜の境界部における剥離強度は、上塗りの残存膜厚の減少に伴い低下する傾向

向にある（図-3）。

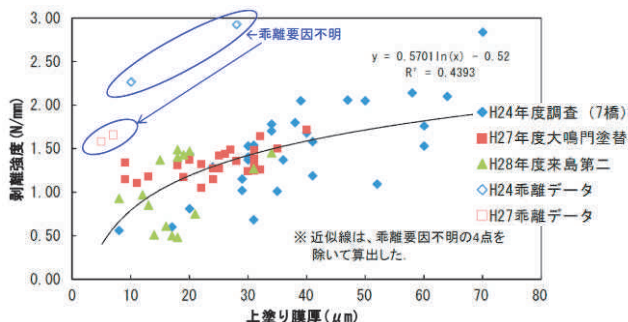


図-3 上塗り膜厚と剥離強度の関係

Fig. 3 Relationship between top coating thickness and separation strength

3.3 熱影響を受けない部位の無機ジンクリッチペイントの劣化原因の推定

犠牲防食効果を期待した無機ジンクリッチペイント層における剥離も重防食塗装系の維持管理における課題となっており、これまでの調査結果によると亜鉛の酸化度が大きくなると付着強度が低下することが明らかとなっている。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調査を実施した。

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-4）。

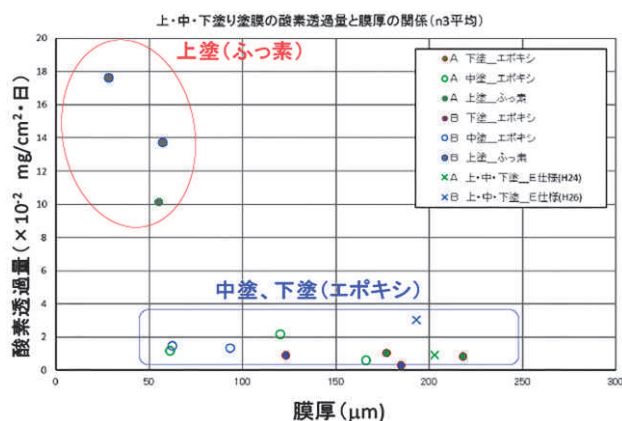


図-4 塗膜厚と酸素透過性能の関係

Fig. 4 Relationship between coating thickness and oxygen permeability performance

3.4 局部補修塗装仕様の策定

無機ジンクリッチペイント層の部分的な剥離が生じた場合の局部補修仕様を設定するため、過去に試験施工を実施した箇所の追跡調査を実施した。その結果、劣化した旧塗膜を除去すれば、無機ジンクリッチペイントでも有機ジンクリッチペイントでも塗膜剥離強度の低下は認

められていないことから、防食下地として有機ジンクリッチペイントを適用した局部補修仕様（案）を提案した。

3.5 主塔塗替塗装の施工法の検討

鉛直方向に高さのある主塔の塗替えにあたっては、高所においても安全で高品質な施工を行う必要がある。また、劣化した旧塗膜は確実に除去する必要があることから、高所における素地調整（1種ケレン）の施工方法について検討を実施した。

本四連絡橋で採用している重防食塗装系については、1工程で効率的に塗膜を剥がすことは困難であるため、有機塗膜はIH工法、無機ジンクリッチペイントはバキュームブラストを適用することを基本工法として選定した。また、これらの施工機械を足場上に搭載するためには、移動昇降足場の使用が有利であることが明らかとなった。今後は、これまでに選定した施工方法を基本として、より安全かつ経済的に高品質な施工を実施するための検討を継続する予定である。

3.6 環境負荷を低減する塗替塗装材料の性能評価

塗替え間隔が延長されることにより環境負荷の低減が期待される省工程型塗料について、宮古島等での暴露試験による塗膜消耗特性の把握及び旧塗膜との付着性を確認するための実橋試験施工の追跡調査を実施した。

3.7 マスコンクリート表面被覆要領における維持管理法の提案

海峡部橋梁マスコンクリートの塩害・中性化の抑制を目的とした表面被覆については、平成25年6月に「海峡部橋梁マスコンクリート表面被覆要領」を制定した。表面被覆の更なるライフサイクルコストの軽減を目的として、要領高度化のための検討を行った。

コンクリート表面被覆に求められるひび割れ追従性（伸び性能）に着目し、より精緻な要求性能の設定を目的として、様々な構造物におけるひび割れ挙動を計測した。また、マスコンクリートのひび割れ幅の拡大は低温時のコンクリートの収縮によって生じるが、これまでの要領では常温時での伸び性能のみを確認することになっている。そこで、要領において推奨されている仕様について、低温時の伸び性能の確認を行った。

コンクリート表面被覆にはがれが生じる原因として、コンクリート内部の水が表面被覆との境界部に供給されることにより付着力低下が生じることが想定された。この劣化メカニズムの解明のため、室内実験を実施した。

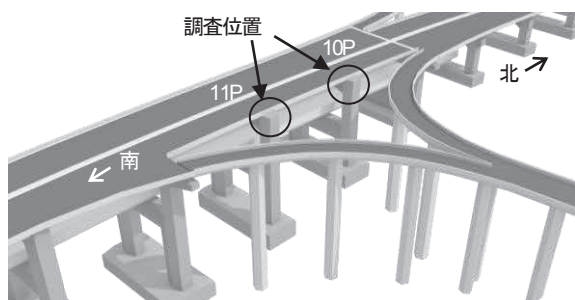
これまでの要領は表面被覆を新規に施工する場合のみを対象としており、既設塗膜の塗替え方法などの維持管理に関する要領については早期の確立が望まれていた。そこで、推奨仕様であるアクリルゴム系塗膜について、塗重ねられる既設塗膜の素地調整程度をパラメータとし

て試験施工を行い、塗替え塗膜の付着強度などから、最適な仕様の検討を行った。

以上の検討を踏まえ、平成28年11月に要領の改訂を行った⁴⁾。今後は、付着力低下の原因究明の継続、その他の推奨仕様の塗替え手法の検討、要求性能を満足する新たな表面被覆材料の検討を行う予定としている。

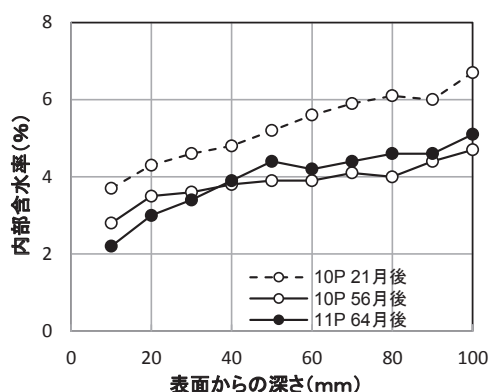
3.8 ASR対策として試験施工したコンクリート表面含浸工の性能評価

コンクリート構造物で発生するアルカリシリカ反応（以下「ASR」という。）による劣化対策として、表面含浸工法が用いられるが、実構造物でその効果を確認した事例は少ない。そのため、ASRが発症している櫃石島高架橋橋脚（図－5）、多々羅大橋ケーブル定着部において試験的に含浸材を施工し、ASRに影響を及ぼすと考えられる内部含水率の変化を継続的に計測した（図－6）。いくつかの含浸材において、経時的に内部含水率を低下させる効果を確認した⁵⁾。



図－5 櫃石島高架橋調査位置

Fig. 5 Surveyed locations (Hitsuishijima Viaduct)



図－6 内部含水率の経時変化

Fig. 6 Transition of water content

3.9 鋼製海中基礎（海中部、飛沫帯部）に対する防食方法の提案

本四連絡橋の海中基礎に用いられている鋼ケーソンの外壁の孔食対策として、電着工法等による防食を進めてきた。しかし、大水深・大規模な鋼ケーソンを従来の電着工法で防食するには、多大な工費と工期が必要となる

ことが想定される。そこで、従来の電着工法に比べ工費と工期の縮減が期待できる薄い電着被膜と維持通電を併用した防食工法（電着・電気防食併用工法）⁶⁾の確立を目的に、その試験施工箇所の追跡調査（電位分布計測、電着被膜調査）を実施している。その結果、試験施工箇所の防食状態が安定的に維持されていることを確認した。今後も試験施工箇所の追跡調査を継続し、薄い電着被膜の長期耐久性等を確認していく予定である。

また、鋼ケーソンの外壁が腐食により消滅した後、ケーソン内部のコンクリートがどのような劣化性状を示すかを確認するため、明石海峡大橋及び瀬戸大橋で施工されたコンクリートと同配合の供試体を製作し、海中における暴露試験を実施している。暴露6年後の調査を行った結果、コンクリート内部の塩化物イオン濃度は暴露前とほとんど変化しておらず、コンクリート内部の鋼材の腐食も認められていない。一方、外観調査では明石海峡大橋において使用した高流動コンクリートの表面モルタルが僅かに消失し骨材が露出する傾向が確認された（写真－1）。今後も暴露試験を継続し、海中におけるコンクリートの劣化状況を確認していく予定である。



(a) 高流動コンクリート



(b) プレパックドコンクリート

写真－1 暴露試験体の外観

Photo 1 Appearance of exposure test pieces

3.10 ケーブル被覆方法の見直し

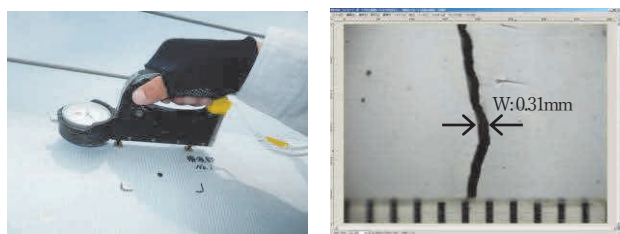
送気乾燥システムを導入した吊橋の主ケーブルは、ケーブルの伸縮に対して追従性を有する柔軟型塗装（柔軟型エポキシ樹脂塗料2層仕様）の被覆により気密化を図っている。しかし、一部の吊橋では塗替塗装後10年程度でひび割れが多発した。このため、表－1に示す伸び性能に優れた新たな塗装仕様に対して、大島大橋での試験施工及び大鳴門橋1A横での暴露試験により、その適用性を調査している⁷⁾。大島大橋での試験施工箇所の3年目調査では、ひび割れ等の変状が確認されていない。今後も試験施工箇所の追跡調査を継続するとともに、暴露試験体による経年的な伸び性能の低下特性を調査する計画である。

また、被覆材料の要求性能（伸び性能）を検討するため、大島大橋と北備讃瀬戸大橋のケーブルを対象に、ケーブル被覆材表面の変位量計測（コンタクトゲージによる10cm標点間隔計測）と、顕微鏡カメラによるひび

割れ開閉量計測を夏季と冬季に行った（写真－2）。その結果、ケーブル被覆材表面の温度変化による変形に追従するためには、現行の柔軟型エポキシ樹脂塗料2層仕様（膜厚205 μm ）から柔軟型エポキシ樹脂塗料を2層多くした柔軟型エポキシ樹脂塗料4層塗り仕様（膜厚385 μm ）程度の仕様が求められることが明らかになった。

表－1 大島大橋塗替試験塗装仕様
Table 1 Recoating specification (Ohshima Bridge)

	柔軟型塗料		アクリルゴム塗料	
	柔軟型エポキシ樹脂塗料 4層塗り	柔軟型エポキシ樹脂塗料 3層塗り	中塗（アクリルゴム） 3層塗り	中塗（アクリルゴム） 2層塗り
素地調整	3種	3種	3種	3種
1層目	柔軟型エポキシ樹脂塗料	柔軟型エポキシ樹脂塗料	下塗（エポキシ樹脂）	下塗（エポキシ樹脂）
2層目	〃	〃	中塗（アクリルゴム）	中塗（アクリルゴム）
3層目	〃	〃	〃	〃
4層目	〃	柔軟型ふっ素樹脂塗料	〃	上塗（アクリルシリコン）
5層目	柔軟型ふっ素樹脂塗料	ハスリップ柔軟型樹脂塗料	上塗（アクリルシリコン）	〃
6層目	ハスリップ柔軟型樹脂塗料	〃	〃	ハスリップ（アクリルシリコン）
7層目	〃	〃	ハスリップ（アクリルシリコン）	〃
膜厚（ μm ）	385	295	888	619
コスト（円/㎡）	7,800	6,200	11,000	8,900
備 考	柔軟型エポキシ樹脂塗料を大島門橋の増厚仕様と同じく、現行X4仕様より2層多くした仕様			



写真－2 10cm 標点間隔計測、ひび割れ開閉量計測
（北備讃瀬戸大橋）

Photo 2 Measurement of gauge length and variation of crack width

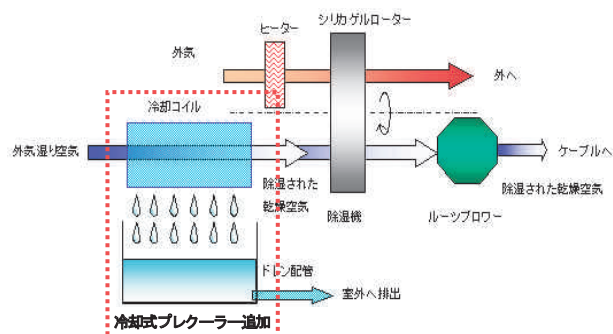
明石海峡大橋のケーブル被覆で採用されているラッピングゴム（ハイパロン塗装）を対象に、ハイパロン塗装のはがれ・消耗がラッピングゴムの劣化に与える影響を調査した。塗膜ははがれから2年9カ月経過した試料を用いた赤外分光分析、熱重量分析などによる調査では、既に表層付近に劣化が進行していることが確認された。このことから、ゴムラッピングを健全に保つためには、塗膜のはがれなどの変状に対しては、早期に補修を実施しラッピングゴムの暴露期間を可能な限り短くすることが重要と考えられる。また、劣化したゴムラッピングの補修仕様について、これまでにゴムシート、テープなどにより補修された箇所の現地調査と、新たな補修仕様の検討を行った。今後、実橋において試験施工を行い、施工性の確認、付着性、外観などの追跡調査を行っていく予定である。

3.11 送気システムの高度化

ケーブル送気乾燥システムの電力消費量は、明石海峡大橋が本四連絡橋全体の約4割を占めている。このため、明石海峡大橋を対象に、乾燥空気相対湿度を常に管理基準値（40%）以下に確保しつつ、設備の消費電力低減を図る経済化運転方法を検討した。

ケーブル送気設備の中で電力の多くを消費する設備は、除湿機である。本除湿機には、冬期の除湿を効率的に行うため、シリカゲルロータを回転させ、空気中の水分を吸着して除湿しその後再生ヒーターで乾燥する吸着式除湿機を採用している。しかし、吸着式除湿機は露点温度が低い冬期でも管理基準値以下の乾燥空気が製造できる利点があるが、市販のヒートポンプを用いた冷却式除湿機に比べ消費電力が約10倍大きくなる欠点がある⁸⁾。一方、冷却式除湿機は、外気を露点温度以下に下げて結露により除湿するため、吸着式除湿機に比べ消費電力は少なく効率的な運転が可能となるが、冬期除湿に限界があり、かつ夏期でも管理基準値まで除湿できない欠点がある。

このため、既設の吸着式除湿機の前に冷却式プレクーラーを設置し、かつ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温度を下げることにより、乾燥空気相対湿度を年間を通して管理基準値以下としつつ、送気設備の消費電力の低減を図る経済化運転を試みた。



図－7 送気設備の改造（冷却式プレクーラー追加）
Fig. 7 Modification of dry air generation unit (with pre-cooler)

経済化運転の実用化にあたって、明石海峡大橋に設置された6台のケーブル送気設備のうち1台を対象として、冷却式プレクーラーの設置と既設吸着式除湿機の再生ヒーター温度を下げる改造を行い、試験運転を実施した（図－7）。経済化運転前後のケーブル送気の相対湿度と送気設備の消費電力の推移を図－8に示す。本改造の結果、高温多湿で大きな除湿能力が必要となる夏期（7～9月）及び露点温度が低く除湿が困難となる冬期においてもケーブル送気湿度は管理基準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、プレクーラー設置前の380kWh/日に対し、改造後は250kWh/日となり、約34%の削減が図れた（図－8）。

本成果を元に明石海峡大橋の残り5台のケーブル送気設備の改造を実施した。今後は、年間を通してケーブル送気の相対湿度を確認しながら再生ヒーター温度やプレクーラーの運転開始条件等の調整を行い、効率的なケーブル送気乾燥システムの運転手法の確立を目指す予定である。

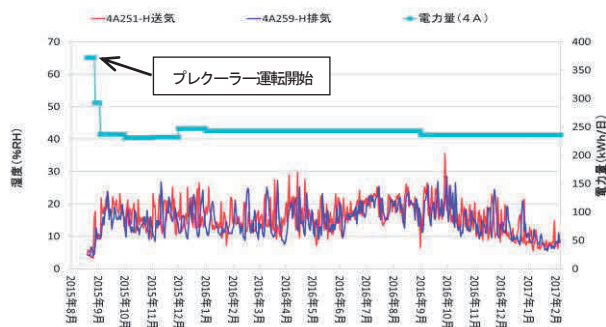


図-8 送気設備の送気湿度と消費電力の推移

Fig. 8 Trends of relative humidity and power consumption

3. 12 ハンガーロープ管理マニュアルの更新

(1)簡易非破壊検査手法の開発

CFRC (Center Fit Rope Core) タイプの吊橋ハンガーロープ (以下「ロープ」という。) の維持管理において、ロープの腐食による断面減少率を適切に把握することが重要となるが、その定量的な評価手法として既に全磁束法が開発されている。一方で、ロープの桁側定着部において全磁束法を適用する際には、ロープの張力解放が必要となることから、より簡易的な非破壊検査手法の開発が課題となっている。このため、磁歪超音波法について、全磁束法による詳細調査を実施する前段階のスクリーニング手法としての適用性を検討した。なお、磁歪超音波法とは、磁歪効果 (強磁性体において、磁場の変化によりひずみが発生する現象) を利用して、断面減少率を評価する方法である。具体的には、1)ロープ一般部に取り付けた発信コイルにパルス状の電流を流し、コイル内の磁場を瞬間的に変化させる、2)磁歪効果によりロープが動的にひずみ、ロープ内を超音波 (疎密波) として伝播する、3)桁側定着部に取り付けた受信コイルにおいて超音波 (鉛直下向き) 通過時に磁場が変化し誘導電流が検出される、4)ロープのソケットで反射した超音波 (鉛直

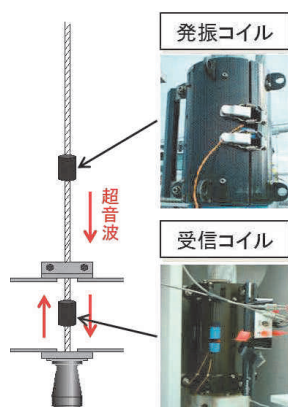


図-9 磁歪超音波法の計測概要

Fig. 9 Outline of magnetostriction method

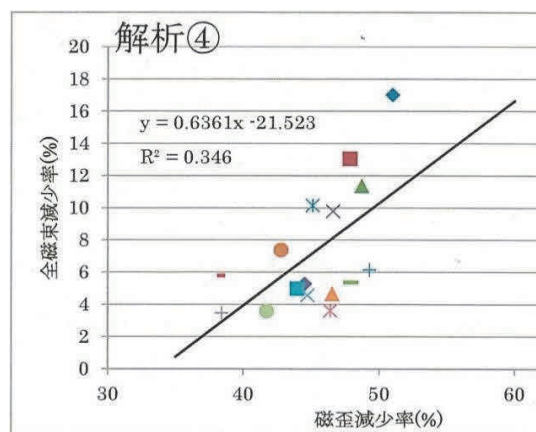


図-10 磁歪超音波法と全磁束法の断面減少率の関係

Fig. 10 Relationship between magnetostriction method and area reduction in magnetic flux method

上向き) が再度受信コイルを通過し誘導電流が検出される、5)2種類の検出電圧波形の減衰比を用いて断面減少率を評価する、という方法である (図-9)。

検討の結果、CFRCロープにおける磁歪超音波法の計測方法や評価手法についてはおおむね確立することができた。しかしながら、現時点では、全磁束法による断面減少率との相関性は高くなく (図-10)、磁歪超音波法をスクリーニング手法として適用することは困難であると判断した。この結果を受けて、ハンガーロープ管理マニュアルの更新を行う予定である。

(2)CFRCハンガーロープ塗替塗装材料の検討

因島大橋のCFRCハンガーロープの塗替塗装 (浸せき塗装) において、強風時 (風速7m/s以上) に塗装表面に風紋の発生が確認された。また、今後、ハンガーロープの塗替塗装が計画されている大鳴門橋と瀬戸大橋では、因島大橋より厳しい風環境にあることから、塗替塗装作業の稼働率低下が懸念された。このことから、浸せき塗装によりロープに付着する塗料の薄膜化による風紋対策を図る方法を検討した。検討においては工場試験を実施し、塗料粘度を変動させ浸せき塗装を行い、風作用時における塗装表面のタレ、シワ、風紋の有無のほか、塗装の仕上がり状態、浸せき塗装器下部からの塗料漏れの有無について評価を行った。

その結果、現行の塗料粘度より若干粘度を落とすことで、薄膜化による風紋対策が図れることを確認した。また、塗料粘度を落としすぎると、薄膜化は図れるが風によるシワが生じやすいことが確認されている。今後、実橋の塗替施工において上記塗料の適用性を検証する予定である。

3. 13 鋼床版縦桁支承の高耐久化手法と亜鉛めっき部材の劣化度評価手法の提案

橋梁付属物は取替え可能な部材であるが、数量が膨大であるため、適切な補修を行うことにより延命化を図りLCCを最小化することが求められている。

鋼床版縦桁支承においては、腐食、さび汁の流出、滑り板（PTFE板）の飛び出し、シーリングゴムのはみ出しなど様々な変状が発生しており、従前より延命化対策の試験施工を行い最適な工法を検討しているところである。今期では、延命化対策として、シーリングゴムの破断防止を目的に、シーリングゴムにPTFE樹脂繊維を巻き付けて摩擦を低減する方法（明石海峡大橋）やステンレスバンドを内蔵したゴムチューブによりシーリングゴムを補強する方法（因島大橋）について試験施工を実施し、その有効性を確認した。さらに、与島橋（2径間部）の耐震補強工事で交換が計画されている鋼床版縦桁支承を対象に、ポット内への雨水浸入防止（水切り、防水カバー）、ポット部の交換、防食性能の向上（金属溶射の採用）など、交換する場合の耐久性向上策を検討し、その結果を耐震補強工事に反映させた。

溶融亜鉛めっき部材は、管理路などの橋梁付属物に多く用いられており、それらを計画的に補修していくうえで、目視調査による劣化度の評価に加え、効率的かつ定量的な劣化度の評価手法の確立が求められている。亜鉛めっき部材の定量的な劣化度の評価手法として、これまでに電磁膜厚計による残存膜厚測定、自然電位計測、表面粗さ計測などの適用性を検討してきたが、目視調査や顕微鏡観察の結果と必ずしも明確な相関は確認されていない。そこで、瀬戸大橋の管理路と因島大橋のオープングレーチングを対象に、新たな劣化度評価方法として、デジタルカメラで撮影した画像データを利用した画像解析処理について有効性を検討した（図-11）。その結果、撮影方法や撮影条件に留意点はあるが、目視調査や顕微鏡観察による劣化度評価とおおむね整合することが確認された⁹⁾。この方法は、亜鉛めっき部材の劣化度の経年変化を効率的かつ定量的に評価する手法として有効であり、従来の目視による劣化度評価と組み合わせることで、よりの確な補修計画策定が可能になると考える。今後も有効かつ簡易な残存膜厚の非破壊調査手法の確立に向けて検討を継続していく予定である。

軽量で強度を有し、酸化腐食がないFRP（繊維強化プラスチック）材料の適用性に関する検討は、平成17年度より大鳴門橋5A横に暴露試験試体を設置して実施している。暴露期間11年となる供試体に対して実施した追跡

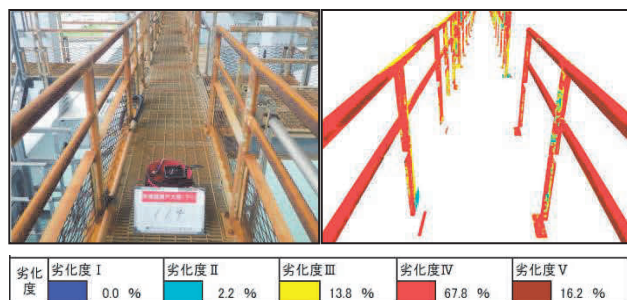


図-11 管理路の画像解析処理事例（左：元画像、右：評価結果）

Fig. 11 Example of image analysis for maintenance way
(Left: Original image, Right: Analytical image)

調査では、塗装で表面保護することにより、ガラス繊維の露出は抑制されること、表面保護の有無による光沢度や繊維の露出度の違いに関係なく強度の低下はないことなどが明らかになった。今後も暴露試験を継続し、より長期的な力学的特性の経年変化を調査するなど、FRP部材の適用範囲拡大に向けて検討を実施していく予定である。

3.14 点検と補修の範囲を拡大するための既存作業車の改造及び簡易足場の試験施工

長大橋の補剛桁には、メンテナンス性を考慮し橋梁点検補修用作業車（以下「作業車」という。）及び管理路が供用当初から設置されている¹⁰⁾。近年、補剛桁には局部的な腐食が発生し効率的な補修が求められており、平成26年の道路法施行規則の改正による近接目視点検に対応するために作業車のアプローチ率の向上が求められている。しかし、大鳴門橋と因島大橋は、他橋に比べ補剛桁のアプローチ率が極端に低いため、今回アプローチ率の向上のための改善検討を実施した。

大鳴門橋の補剛桁には、管理路の他に桁内面作業車及び桁外面作業車が設置されているが、アプローチ率は約40%と小さい。一方、ボルト添接部、鋼床版縦桁支承部等、補剛桁でも近接しにくい箇所には局部的な腐食が発生している。このため、これらの補修を安全・確実かつ効率的に行うための既設作業車の改造検討を実施した。作業車改造案を図-12に示す。作業車改造の内容は、1)桁内面作業車の作業床を改造し横行台車補助作業台を拡幅、2)外面作業車外側の側面フレーム両側及び下面作業台中央部への伸縮ブーム型作業装置の増設である。これら改造を行うことにより、補剛桁部材へのアプローチ率は約90%に向上し、局部補修が必要な鋼床版縦桁支承等の変状箇所へのアプローチ率は約99%対応可能となる見通しである。

因島大橋の補剛桁には、管理路のほかには桁外面作業車が設置されているが、アプローチ率は約50%と小さい。一方、添接部、鋼床版裏面部及び縦桁支承部等、近接しにくい補剛桁の一部に局部的な腐食が発生している。このため、これら補修を安全・確実かつ効率的に行うために、新たな接近手段としてステップ足場を検討し試験施工を実施した（写真-3）。ステップ足場は、上部管理路を利用して特殊ブラケットを主横トラス上弦材に設置し、鋼製布板をはめ込むアプローチ手法である。本ステップ足場の活用により、補剛桁全体へのアプローチは約59%に改善でき、鋼床版縦桁支承の約92%の箇所と主横トラス上弦材へのアプローチが可能となる。試験の結果、ステップ足場による補修では、吊り足場の架設による補修に比べ工費が約1割削減でき、かつ足場架設時間の約半分の短縮と補修工程の短縮が図ることを確認した¹¹⁾。

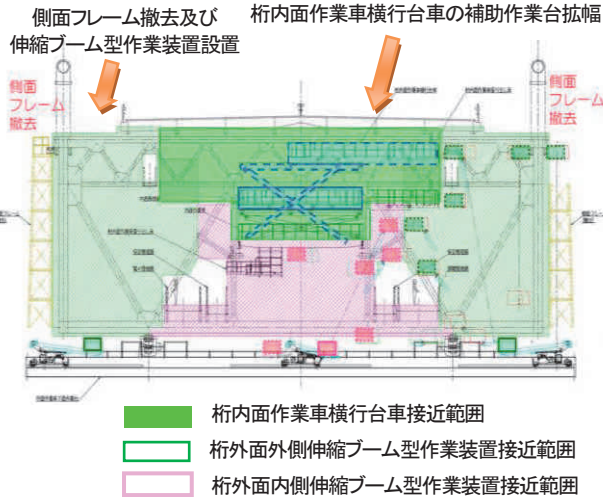


図-12 大鳴門橋作業車の改造イメージ
Fig. 12 Modification plan for maintenance vehicles
in Ohnaruto Bridge
(additional platforms, modification of existing platforms)



写真-3 ステップ足場の設置状況
Photo 3 Setting-up of step scaffolding

3.15 道路鉄道併用橋のAUTによる疲労亀裂調査法の立案

瀬戸大橋の建設当時、鉄道橋への調質高張力鋼の使用実績はわずかであり、疲労に関する知見は限られたものであった。そのため、疲労設計において、橋種、継手種類、鋼種と応力比から疲労許容応力範囲を設定し、疲労設計荷重から発生する応力範囲を照査するとともに、製作基準で許容きず（建設当時は「溶接欠陥」と呼称）の寸法を部材ごとに規定し、厳格な品質管理のもと、施工時に許容きずのサイズが記録されている。また維持管理段階では、建設時に検出された許容きずのうちサイズが大きく、部材の等級分類が高いもののいくつかを自動超音波探傷（AUT）により追跡調査し、亀裂進展解析により100年後の亀裂寸法を把握する体制がとられてきた。平成12年度まで実施された追跡調査結果では、亀裂進展

は確認されず、亀裂が許容値まで達するには100年以上要することが確認されており、その後の追跡調査は実施されていない。

現在、瀬戸大橋には新幹線荷重は載荷されず、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に現地計測を実施することとした。

現地計測は、疲労の影響が大きい、すなわち疲労環境が厳しく疲労等級が低い部材を対象とし、活荷重の影響が大きい吊橋補剛桁主構弦材で製作時AUT検査で大きなきずがある部材を選定した。計測位置を図-13に、測定結果を表-2に示す。応力範囲の最大は、貨物列車（下り）とマリンライナー5両（上り）が同時に通過した時の55MPaで、疲労許容応力範囲の82%であった。また繰り返し回数にあたる列車運行回数は151回/日で、設計時に想定した760万回/100年の約73%となっている。

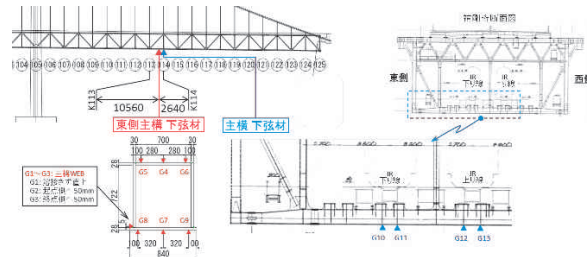


図-13 計測位置（南備讃瀬戸大橋）
Fig. 13 Measurement locations (Minami Bisan-seto Bridge)

表-2 測定結果
Table 2 Measurement results

	設計	今回計測(1)	今回計測(2)
荷重編成	設計基準作成時の実績等により設定	貨物列車(下) +マリンライナー5両(上)	マリンライナー5両(下)
荷重	(単線載荷) 2.7 ton/m × 400m = 1080 ton(1.00)	(貨)900 + (マ)218 = 1118 ton(1.04)	218 ton(0.20)
最大応力範囲(Δσ)	(1次完成) 62 MPa(0.93) (最終完成) 63 MPa(0.94)	55 MPa(0.82)	25 MPa(0.37)
疲労許容応力範囲	67MPa(1.00)		
100年間の繰り返し回数(N)	在来線: 90本/片道/日 新幹線: 14本/片道/日 104 × 2 × 365 × 100 = 760万本(1.00)	貨物列車 8本/日 × 365 × 100 = 29万本(0.04)	貨物列車以外 143本/日 × 365 × 100 = 522万本(0.69)

これらの測定結果より、鋼道路橋疲労設計指針に準拠して算出される疲労寿命は約700年となり、疲労環境的には設計時の想定と比較して安全な状況であると考えられる。ただし、貨物列車の応力範囲は許容値に近いため、許容きずからの疲労亀裂進展が将来発生することが想定される。

3.16 赤外線サーモグラフィ（温度ギャップ法）による鋼床版疲労亀裂スクリーニング調査マニュアルの作成

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、本四連絡橋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、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貫通亀裂を検出する技術（特許取得済み）を開発した。この手法の原理（図-14）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。この手法では、塗膜割れを伴わない亀裂であっても遠隔から検出でき、さらには目視の場合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。

本手法による疲労点検は、平成27年度から、優先順位を考慮して開始している。また、効率的な赤外線撮影が可能な装置（写真-4）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、平成28年から実橋での点検に適用している。

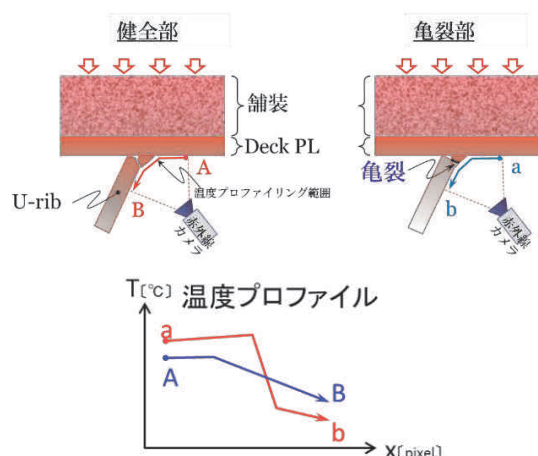


図-14 温度ギャップ法による亀裂検出の原理
Fig.14 Principle of fatigue crack detection with temperature gap method

3.17 赤外線サーモグラフィ（熱弾性法）の疲労業務への適用性検討

インフラ構造物の安全性を維持するためには、定期的な検査と構造健全性評価、適切な補修が必要である。補修後には補修による応力低減効果、亀裂再発生の可能性を検証することが重要となるが、ひずみゲージ等による従来の計測法では十分な検証ができない場合がある。これに対し、近年注目されている非破壊評価手法として、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力分布計測法がある。ここでは、瀬戸大橋斜張橋の縦桁と横桁交差部の垂直補剛材に発生した疲労亀裂を対象とし、疲労亀裂の補修前後に熱弾性応力測定を行うことで、補修による応

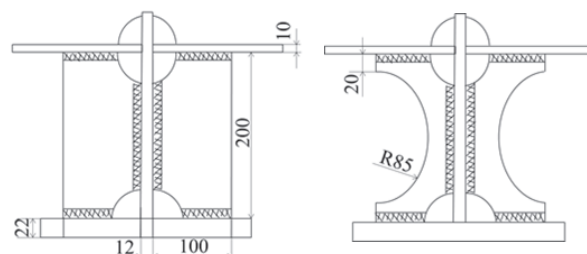
力低減効果を検証した。



写真-4 開発した撮影装置による点検
Photo 4 Inspection with developed device

実橋では、疲労亀裂が発生した垂直補剛材に対し、溶接部の応力低減及び応力集中箇所を溶接部から母材部に移すことを目的とした補修を行っている。その補修施工の際に、総重量約200kNの荷重車を走らせ、計測箇所直上の車線を80km/hで通過した際の熱弾性応力変動を赤外線サーモグラフィにより計測した。補修施工は、1)ウェブギャップ板への半円切り欠き、2)溶接部の疲労亀裂除去、再溶接と溶接部止端仕上げ（以下「再溶接」という。）の順で行った。半円切り欠き施工前後のウェブギャップ板の形状を図-15に示す。

半円切り欠き施工前及び再溶接後における熱弾性応力分布状況を図-16に示す。半円切り欠き補修施工前では、溶接部の疲労亀裂先端に応力集中が見られるのに対し、再溶接後では切り欠きR部に応力が集中している。また亀裂先端近傍での応力値が切り欠き補修後には低減しており、最大応力作用位置が亀裂先端から切り欠きR部に移ったことがわかる。また、疲労強度等級が低い溶接部から、疲労等級の高い鋼材母材部に応力集中部を移すことにより、溶接部での疲労亀裂の再発生を防ぐ補修が的確に施されたことが熱弾性応力計測により検証できたと考えられる。



(補修前) (補修後)
図-15 ウェブギャップ板
Fig.15 Web-gap plates

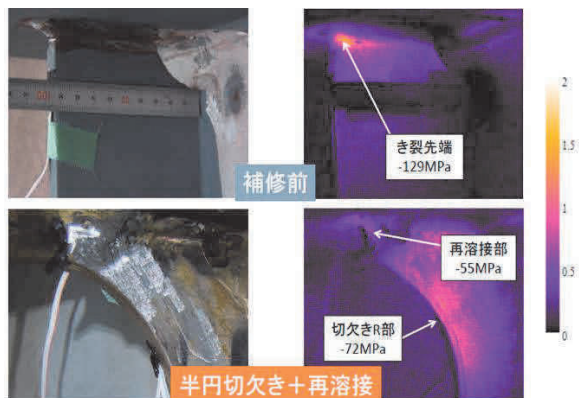


図-16 応力分布状況

Fig. 16 Stress distribution

3. 18 鋼床版デッキプレートとUリブ溶接部疲労亀裂の補修方法の確立

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貫通亀裂に対す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、下面からのみで施工可能な有効な手法は開発途上であった。そのため、関西大学と共同で下面からのみで可能な補修法を開発し、実橋において施工した。

開発した補修方法は、当て板によって補修する方法である。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(以下「MUTF20」という。)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TRS(スレッドローリングスクリュウ)φ16による支圧接合としている。図-17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。以下に概略の手順を示す。

- 1) 当て板範囲ビード両端部の削孔
- 2) デッキプレート - Uリブ溶接部の切削
- 3) 当て板仮留め
- 4) Uリブ側のMUTF20ボルト孔の削孔及び中心付近の2本を1次締め
- 5) デッキプレート側のTRSφ16ボルト孔の削孔及び締め込み(1本づつ)
- 6) Uリブ側のMUTF20の締め込み
- 7) シーリング及び塗装による防せい

施工にあたっては、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「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。

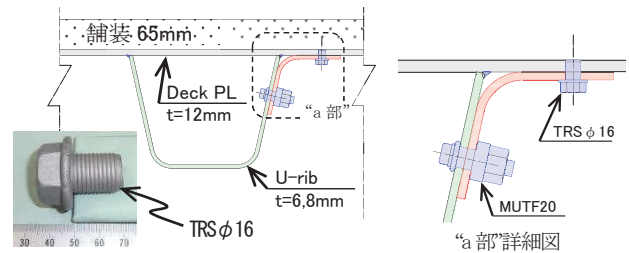


図-17 下面補修法詳細図

Fig. 17 Detail of repair method from lower side of deck

今後は、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ともに、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. 19 対象橋梁の耐震補強工事用の設計図・施工計画の作成

兵庫県南部地震のような内陸直下型やプレート境界に生じる海洋性の大規模地震に関する最新の知見を踏まえ、本四連絡橋長大橋の耐震性のさらなる向上を目的に、耐震性照査、補強設計、施工計画の立案等を行ってきた。長大橋の耐震検討には最新の知見とともに、それぞれの橋梁の地盤条件等を考慮して設定された耐震検討用地震動を用いた。明石海峡大橋、大鳴門橋等の検討に引き続いて、技術開発計画期間中、道路鉄道併用橋である瀬戸大橋各橋を対象として、耐震性照査等を実施した。耐震検討に使用した設計地震動⁴⁾は、次の3種類の地震を対象として設定したものである。

- ・ 東南海・南海地震
- ・ 中央構造線(鳴門-石鎚断層)の地震
- ・ 伏在断層(横ずれ、逆断層)の地震(M6.8)

瀬戸大橋の耐震検討にあたり、道路橋としての目標耐震性能は道路橋示方書⁴⁾における耐震性能2を確保するものとし、鉄道構造物としての要求性能は鉄道構造物等設計標準⁵⁾における安全性と復旧性を満足するものとした。耐震検討の基本方針は参考文献43)に示す。耐震検討には、原則として、道路橋示方書を適用したが、列車荷重については、鉄道構造物等設計標準に基づき、地震時列車荷重(EA-17: 35kN/m)を単線満載で考慮した。

技術開発計画期間内において、吊橋及び斜張橋に加え、トラス各橋、与島高架橋を除いた高架橋の耐震性照査、補強設計等を終えた。

吊橋の耐震性照査の結果、3橋とも、センタースティが破断すること、道路桁支承が損傷することが確認された。耐震性能2を確保するという観点から、センタース

テイの補強は不要と考え、損傷する道路桁支承とそれに関連する部材を対象とした補強設計⁴⁾を行った。図-18に補強例⁴⁾を示す。斜張橋2橋は耐震性照査の結果、損傷が確認された部材は横トラス下弦材数カ所のみであった。地震時に作用する圧縮力による局部座屈に伴う損傷であるため、当該部材の座屈パラメータを改善するために、補強リブを取り付ける補強を実施する予定である。吊橋及び斜張橋各橋の損傷数に比較して、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ことが確認された。櫃石島高架橋トラス部⁴⁾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結果、鉄道が供用する橋として初めてトラス桁支承の免震化を採用することにより、補強不可能部材の損傷を回避することが可能となり、また、鉄道上空の作業を大幅に軽減することができた。同様に、多くの損傷箇所が確認された与島橋2径間部⁴⁾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、道路桁支承による反力分散化により、トラス橋に作用する地震力を軽減できることが確認でき、補強不可能部材の損傷を回避することができた。一方、与島橋3径間部⁴⁾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く、損傷箇所（トラス部材や道路桁支承（写真-5））を直接補強することにより耐震性の向上を図った。番の州高架橋トラス部⁴⁾は、吊橋アンカレイジを固定端とする挙動により、損傷部材数が多かったが、制震ダンパー（写真-6）を設置することにより、橋軸方向の地震力を軽減することが可能となり、残った損傷箇所を補強することにより、耐震補強策とした。一方、これら長大橋をつなぐ高架橋⁴⁾においては、一般の道路橋と同様、橋脚のせん断補強（写真-7）、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。櫃石島高架橋や岩黒島高架橋においては、橋脚補強として、炭素繊維巻立てもしくはアラミド繊維巻立てを実施することにした。しかし、地盤条件の違いから、これら2橋とは異なり、番の州高架橋の補強数量はわずかであることが確認できた。

本3カ年計画内に耐震検討を完了できなかった与島高架橋については、平成29年度内には耐震補強設計を終える予定である。

平成28年度から、西瀬戸自動車道長大橋の耐震検討にも着手しており、引き続き3カ年計画中に、各長大橋の耐震性を確認したいと考えている。

3.20 鋼床版舗装の局部補修方法の提案

これまでの本四高速における鋼床版グースアスファルトの変状は局部的なもの（小規模なブリスタリング等）が主となっている。このため、変状箇所の補修はグースアスファルトの毀損範囲を部分的に打ち替えることを基本としている（写真-8）。この場合、既設健全部と新設部との打ち継ぎ部の止水対策（水密性確保）が重要課

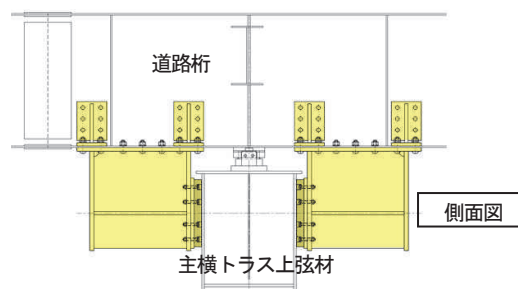


図-18 道路桁支承補強例（吊橋）
Fig. 18 Seismic Retrofit for Road Deck Bearing



写真-5 道路桁支承補強（与島橋）
Photo 5 Seismic Retrofit for Road Deck Bearing



写真-6 制震ダンパー（番の州高架橋トラス部）
Photo 6 Viscous Damper



写真-7 繊維巻立て補強（櫃石島高架橋）
Photo 7 Fiber Lining

題となる。また、既設同等のグースアスファルトで補修する場合、その製造単位、クッカー車による運搬単位から不経済となることが多いため、施工性・経済性等にす

ぐれた材料を選定する必要がある。平成28年度においては、既存技術を調査し適切な材料選定を行い、次年度以降に引き続きホイールトラッキング試験等により物性値の確認を実施する。



写真-8 グースアスファルトによる部分補修
Photo 8 Partial re-pavement by guss asphalt

3.21 本四高速道路における舗装劣化予測モデルの作成

これまでの調査において、鋼床版舗装のグースアスファルトは全体的に健全であるが、局部的に割れが発生し、鋼床版表面に腐食が確認されている箇所も存在する。グースアスファルトの状態を確認するためには、現況のグースアスファルトを剥離させる必要があり、健全な箇所に無用の損傷を与える可能性がある。このため、RC床版の非破壊検査で実績のある地中レーダーを用いて、非破壊によりグースアスファルトの健全度評価が可能かを検証した(図-19)。この結果、地中レーダー解析画像による損傷判断と現地の開削調査結果が合致しないものもあり、解析画像による損傷評価の再検証が必要と判断している。この再評価については、平成29年度以降、引き続き検討していく。

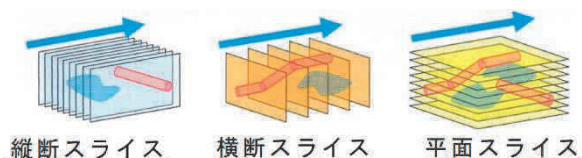


図-19 地中レーダーによる解析イメージ
Fig. 19 Analytical image of ground penetrating radar

限られた予算とお客様への快適な走行を提供する快適走行路面率(舗装アウトカム)を両立させるために、路面性状調査結果に基づく、劣化予測を高精度で行う必要がある。路面性状の的確な把握と劣化予測の精度向上を目的にこれまでに舗装マネジメントシステム(以下「JBPMS」という。)を導入しているが、より劣化予測精度を高めるために検討業務を実施した。平成28年度は、一部区間についてマルコフ劣化モデルによる試算を実施

しJBPMSの劣化予測の検証を行った。結果として、JBPMSによる劣化予測の場合、マルコフ劣化モデルに比べ劣化進行が若干遅れる結果となっている。今後、より多くのデータをベースにマルコフ劣化モデルの検証を行い、より高い精度の劣化推計手法を検討していく。

3.22 近接目視困難な高架橋張り出し床版部の剥落点検の合理化方策の確立

コンクリート構造物の経年劣化による浮きや剥離等の損傷は、コンクリート片の剥落による第三者被害につながる危険性があるため、早期に検出を行い剥落防止に努める必要がある。このうち、近接困難な高所にあるコンクリート橋の部材の点検手法として赤外線サーモグラフィによる遠隔からの点検方法があるが、床版下面などの日照が期待できない部位では熱移動が小さく点検結果の信頼性が不十分である。このためコンクリート高架橋の上下線の隙間からヒーターと赤外線サーモグラフィを懸垂させヒーターの加熱によるアクティブ法の適用を検討した。

対象としたコンクリート高架橋の断面と機器の配置を図-20に示す。高架橋の張出床版下にはコンクリートの浮きを模擬した人工欠陥を設置した。

ヒーターの加熱によるアクティブ法の前に、パッシブ法による測定を実施した。写真-9に示すように、パッシブ法でも人工欠陥導入部に温度差が生じており、検出は可能であった。またヒーター加熱によるアクティブ法の結果を写真-10に示す。ヒーター加熱により欠陥が明確に認められ、さらにヒーターを低速で移動させた場合の方が欠陥部の温度差が大きくなりコントラストが改善されるため、欠陥検出性が向上することがわかった。

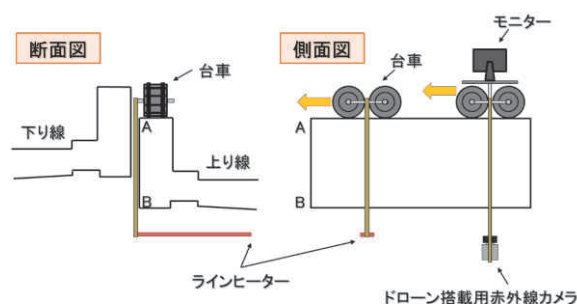


図-20 高架橋断面と測定機器
Fig. 20 Measument devices

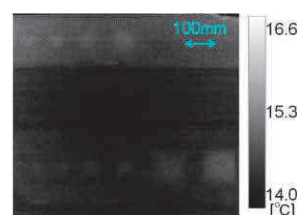


写真-9 測定結果(パッシブ法)
Photo 9 Measument result (passive method)

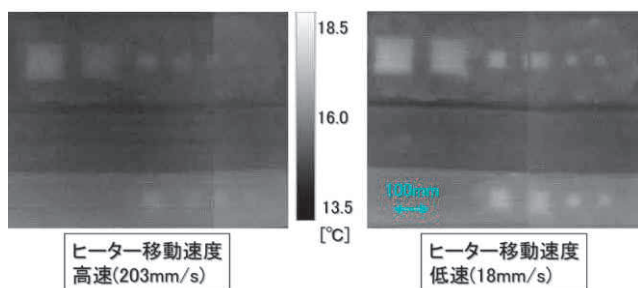


写真-10 測定結果（アクティブ法）
Photo 10 Measurement results (active method)

3.23 ケーブルバンドボルト軸力（縦締め形式）管理マニュアルの作成

吊橋ケーブルバンドボルトについては平成25年9月に「ケーブルバンドボルト軸力管理マニュアル」が制定されているが、同マニュアルは横締め形式のケーブルバンドボルトを対象としており、来島海峡大橋で採用された縦締め形式のケーブルバンドボルトを対象としていない。縦締め形式のケーブルバンドは横締め形式とは異なった挙動をすると考えられ、設計要領としてまとめられているが、維持管理における軸力計測及び増し締め等の作業を最適化するため、適切な管理基準を設けるための検討を行った。

現在の縦締め形式バンドボルト軸力管理手法としては、滑り照査に加えてボルト軸力変動の照査が必要とされている。これは、ボルト軸力が抜けるとハンガー張力に応じてボルトに付加軸力が発生し、疲労損傷が懸念されるためである。ここで、軸力変動の照査は、設計時のL活荷重によるハンガー張力を照査時の作用力としており、実橋の疲労照査では過大となっている可能性がある。このため、実橋計測によりハンガー張力及びバンドボルト軸力の変動量を把握することとした（写真-11）。

実橋での計測の結果、1)ボルト導入軸力が小さい（軸力が抜けた状態）とボルトの付加応力は大きくなる、2)ただし、その応力範囲は小さく疲労が懸念されるレベルではない、と考えられるデータが得られた。このことを踏まえた上で、管理マニュアルの整備に向けて現在作業中である。



写真-11 実橋計測状況
Photo 11 Actual measurement

3.24 点検・補修管理システム（JB-IRIS）の改良

平成26年7月の道路法施行規則の改正を受け、省令の改正趣旨を踏まえた変更内容について他の高速道路会社と意見交換を行いながら、一般土木、長大橋梁、機械設備及び電気通信施設の各点検管理要領の改訂を行った。

特に、本四道路の特徴である長大橋梁点検要領については、外部有識者による「長大橋の点検に係る専門委員会」を設置し、各橋梁の構造特性を踏まえ部位ごとの近接方法を明確にすることで点検における今後の課題を明らかにするとともに、国内外の長大橋梁の点検内容、頻度、点検方法等と比較して点検内容の妥当性を検証した。

また、点検・補修情報を一元的に管理する「点検・補修情報管理システム（JB-IRIS）」については、点検結果に基づく変状の判定基準を国の基準（Ⅰ～Ⅳ）へ変換する機能や、橋梁、トンネル、カルバートなどの構造物単位ごとにとりまとめる機能を追加した。

さらに、点検業務の効率性向上を目指して、モバイル端末を用いたモバイルシステムの試験的導入も行っている。

3.25 耐風安定性の再評価

長大橋の実現において耐風安定性の確保は最も重要な課題の一つとして挙げられ、本四連絡橋の建設にあっても、その当時の最新の知見に基づく検討が実施され耐風安定化対策等が決定されている。一方、供用後にこれらの耐風安定化対策が維持管理上の課題となる状況が発生した場合は、最新の知見に基づく耐風安定性の再照査を実施し、合理的で経済的な維持管理手法の提案を行っている。

本技術開発計画においては、道路鉄道併用橋である瀬戸大橋の吊橋3橋に耐風安定性の確保を目的として設置しているオープングレーチングの必要範囲に対する検討を実施した。検討にあたっては、当初設計時に二次元のバネ支持風洞試験により耐風安定性の照査を実施した瀬戸大橋に対し、明石海峡大橋の耐風性検討において開発された三次元フラッター解析手法を適用することにより、橋軸方向の断面変化に伴う耐風安定性の再照査を実施した。

フラッター解析の実施にあたり必要となる空気力係数は、横浜国立大学との共同研究により現状断面及びグレーチングを閉塞した断面について求めた。得られた空気力係数を使用し、本四高速が保有するフラッター解析プログラムによるパラメトリックな解析を実施し、橋軸方向のグレーチング閉塞可能範囲を求めた。その結果、瀬戸大橋の3吊橋において中央径間中央付近を除きグレーチングを閉塞することが可能となることが明らかとなった（表-3）。これにより、道路階から鉄道階への落下物対策が大幅に軽減されるとともに、鋼床版縦桁支承の腐食環境も改善されることが期待される。なお、グレーチングが必要な範囲は多くないことから、さらなる

閉塞範囲の拡大を目的として、簡易な耐風安定化対策の検討を実施する予定である。

表－3 瀬戸大橋のグレーチング閉塞可能範囲
Table 3 Possible closing range of grating

橋梁名	側径間	中央径間
下津井 瀬戸大橋	全て閉塞可	主塔から330m (280m)
北備讃 瀬戸大橋	全て閉塞可	主塔から460m (70m)
南備讃 瀬戸大橋	全て閉塞可	主塔から240m (620m)

() 書きは中央径間中央のグレーチング必要長

4. 新技術開発計画

平成28年度をもって、3カ年にわたる本計画が終了した。平成29年度以降の技術開発計画（以下「新計画」という。）は、計画期間を同じく3年間とし、期間内に成果をとりまとめ、実用化あるいは継続取組みや新たな取組目標を設定することとした。具体的な技術開発項目の設定にあたっては、本計画での検討結果を踏まえるとともに、長大橋のリスク分析結果やアセットマネジメントの観点を考慮した。

新計画は、これまで通り、長大橋技術センターを中心として、保全部・各管理センター・（株）ブリッジエンジニアリング一体となった検討体制を継続し、保全技術交流会議の場を活用していく。開発項目を以下に示す。

4.1 防食分科会

(1) 塗装（鋼）WG

- ・劣化予測精度の向上（継続）
- ・新塗料規格の制定（省工程型塗料の開発）（継続）

(2) コンクリート保護工WG

- ・マスコンクリート表面被覆要領の改訂（継続）
- ・ASR対策表面保護材の性能確認（継続）

(3) 海中基礎防食WG

- ・電着・電気防食併用工法の確立（継続）

(4) ケーブル送気WG

- ・ケーブル気密化のためのラッピング法に応じた最適被覆法の確立（継続）
- ・効率的なシステムの構築と運転手法確立によるLCC最適化の実現（継続）
- ・新たなケーブル防食方法の開発（新規）

(5) ハンガーロープWG

- ・ハンガーロープ管理要領の更新（継続）
- ・補修塗装仕様の提案（継続）

(6) 橋梁付属物WG

- ・鋼床版縦桁支承の延命化方法の提案（継続）
- ・亜鉛めっき部材の劣化予測手法の提案（継続）

- ・FRP材の適用範囲の拡大（継続）

4.2 疲労分科会

- ・道路鉄道併用橋の疲労安全性評価に関する検討（継続）
- ・鋼床版疲労点検の合理化検討（継続）
- ・赤外線サーモグラフィの疲労点検・評価への適用に関する検討（継続）
- ・疲労亀裂補修の推進（継続）
- ・疲労専門業務の効率的な実施（新規）
- ・鋼主桁疲労安全性評価法に関する検討（新規）

4.3 耐震分科会

- ・長大橋の耐震性能照査・耐震補強設計（継続）

4.4 舗装分科会

- ・グースアスファルト局部補修方法の提案（継続）
- ・舗装劣化予測手法の提案（継続）
- ・鋼床版舗装評価方法の検討（新規）

4.5 点検分科会

(1) 点検技術WG

- ・近接目視点検困難箇所の点検手法の検討（継続）
- ・新たな点検手法の開発（継続）
- ・光学計測による部材表面の劣化評価に関する検討（新規）

(2) 点検要領・システムWG

- ・個々のシステムの改善（長大橋の塗装マネジメントシステム）（継続）
- ・GIS等他システムとの連携の検討（継続）

4.6 耐風分科会

- ・維持管理性を考慮した耐風安定化対策の評価（継続）

今後、これらの技術開発項目に関する検討を着実に進捗させ、アセットマネジメントの考え方に基づく、本四連絡橋の中長期保全計画の効果的・効率的実施に活用していく。

参考文献

（本計画の実施期間内に、検討成果の一部として公表したものについては下線を付す。）

- 1) 大塚雅裕、楠原栄樹：重防食塗装の劣化予測手法の開発、土木学会 構造工学論文集、Vol.62A、pp.492-502、2016.3
- 2) 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
- 3) 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
- 4) 花井拓、山根彰、楠原栄樹：海峡部橋梁マスコンクリート表面被覆要領の改訂、本四技報、Vol.42、No.129、pp.18-

24、20179

- 5) 楠原栄樹、山根彰、西村徹也：含浸材によるコンクリート内部含水率の経時変化と測定時温度に関する考察、第71回年次講演会、20169
- 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、Vol40、No.126、pp.18-23、20163
- 7) 森山彰、梶尾光邦：ケーブル気密化のための塗装仕様検討と試験施工、本四技報、Vol.39、No.124、pp.10-15、20153
- 8) 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、20129
- 9) 安部真理子、門田整達、遠藤和男：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、本四技報、Vol.41、No.128、pp.18-23、20173
- 10) 廣田昭次、松尾俊宏：点検補修用作業車の変遷、本四技報、Vol.40、No.126、pp.10-17、20163
- 11) 大廻聡、森脇正生、尾崎泰祐：吊橋縦桁支承の点検補修用簡易足場検討、第71回土木学会年次講演会、20169
- 12) 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、20153
- 13) 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性能の確認、土木学会第71回年次学術講演会、20169
- 14) 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.60、20168
- 15) 大川宗男、森山彰、熊井貴弘：高耐久性ふっ素樹脂塗料の開発と適用、橋梁と基礎、Vol.49、2015.10
- 16) 楠原栄樹、山根彰：表面保護工によるコンクリート内部含水率の変化、本四技報、Vol.40、No.125、pp.50-51、20159
- 17) 大塚雅裕、楠原栄樹、山根彰、西村徹也：表面保護工によるコンクリート内部水分量の変化、土木学会第70回年次学術講演会、20159
- 18) 大塚雅裕、楠原栄樹、山根彰、西村徹也：シラン系表面含浸材を塗布したコンクリートの水分逸散性能、土木学会第70回年次学術講演会、20159
- 19) 井場健太、森川英典、川島洋平、中西智美、楠原栄樹：ひび割れからアルカリ水供給を受けるコンクリート表面被覆材の付着劣化に関する検討、土木学会第70回年次学術講演会、20159
- 20) 川合将斗、森川英典、中西智美、楠原栄樹：ASR劣化状況の違いがシラン系表面含浸材を塗布したコンクリートの水分逸散性能に及ぼす影響、土木学会第71回年次学術講演会、20169
- 21) 森山彰、熊井貴弘：吊橋ケーブル被覆の劣化調査と伸び性能に着目した被覆仕様の検討、高速道路と自動車、Vol.58、No.11、2015.11
- 22) 楠原栄樹、山根彰：引抜成形 FRP 材の疲労特性、土木学会第70回年次学術講演会、20159
- 23) 森山彰、大藤時秀：吊橋ケーブル被覆の劣化調査と伸び性能に着目した被覆仕様の検討、土木学会第69回年次学術講演会、20149
- 24) 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
- 25) 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、20083
- 26) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針、2002.5
- 27) 和泉遊以、阪上隆英、西脇周季、溝上義昭、小林義弘：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の検出性及びその高精度化に関する検討、土木学会第70回年次学術講演会、20159
- 28) 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、Vol.22、No.87、20159
- 29) 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、pp.2-10、20159
- 30) 阪上隆英、和泉遊以、溝上義昭、森山彰：温度ギャップ法による疲労亀裂検出技術の実用化、日本機械学会関西支部第91期定時総会講演会、20163
- 31) 大藤時秀、溝上善昭、和泉遊以、阪上隆英：温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による亀裂検出実用化システム、土木学会第71回年次学術講演会、20169
- 32) 藤城忠朗：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、20159
- 33) Takahide Sakagami, Yui Izumi, Daiki Shiozawa, Taisei Fujimoto, Yoshiaki Mizokami, Taku Hanai : Nondestructive evaluation of fatigue cracks in steel bridges based on thermoelastic stress measurement, European Conference on Fracture 2016, 2016.6
- 34) 藤本泰成、溝上善昭、花井拓、阪上隆英、塩澤大輝、東智之、和泉遊以：熱弾性応力測定による鋼構造の疲労き裂補修対策実施効果の検証、土木学会第71回年次学術講演会、20169
- 35) 楠元崇志、奥村淳弘、坂野昌弘、小林義弘、溝上善昭：Uリブ鋼床版のビードき裂に対する補修方法の検討、土木学会第70回年次学術講演会、20159
- 36) Y. Mizokami, Y. Kobayashi, Y. Kishi, M. Sakano : A study on Repair Method using TRS for Fatigue Cracks in Orthotropic Steel Deck, IABMAS2016, 2016.6
- 37) 溝上善昭、花井拓、鎌田将史、新野貴大、神田隼太：Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂の進展特性、土木学会第71回年次学術講演会、20169
- 38) 金澤高宏、貴志有基、溝上善昭、森下元晴、西山圭介、坂野昌弘：Uリブ鋼床版のビード亀裂に対する下面補修、土木学会第71回年次学術講演会、20169
- 39) 溝上義昭、森山彰、貴志有基：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、本四技報、Vol.41、No.128、pp.2-9、2017.3

- 40) 福永勸、竹口昌弘、遠藤和男：耐震性能評価用大規模地震動の設定（瀬戸大橋）、本四技報、Vol.35、No.115、pp.37-38、2010.9
- 41) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、2012.3
- 42) 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、2007.1
- 43) 福永勸、角和夫、遠藤和夫：瀬戸大橋の耐震補強検討、本四技報、Vol.36、No.117、pp.36-37、2011.9
- 44) 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
- 45) 福永勸、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
- 46) 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
- 47) 福永勸、河藤千尋、竹口昌弘：瀬戸大橋PC橋の耐震対策検討、本四技報、Vol.39、No.123、pp.45-46、2014.9
- 48) Susumu Fukunaga, Masahiro Nishitani, Chihiro Kawato, Naoki Toyama : Seismic retrofit for the truss bridges of the Seto-Ohashi Bridges, 19th IABSE Congress, 2016.9
- 49) 竹内優人、藤本泰成、阪上隆英、和泉遊以、花井拓、溝上義昭、森山彰：アクティブ赤外線法による構造物の非破壊検査、日本機械学会関西支部、2016.3
- 50) 内藤将志、勝地弘、山田均、楠原栄樹：瀬戸大橋トラス補剛桁のオープングレーチング閉塞の影響調査、土木学会第71回年次学術講演会、2016.9
- 51) 楠原栄樹、山根彰、花井拓、町田陽：下津井瀬戸大橋の耐風安定性に関する一考察、土木学会第72回年次学術講演会、2017.9

海峡部橋梁マスコンクリート表面被覆要領の改訂

Revision of Guideline for Coating of Mass Concrete Structure of Long-Span Bridge

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

山根 彰 Akira Yamane

しまなみ尾道管理センター
橋梁維持課長
(前) 長大橋技術センター
防食・耐風グループサブリーダー

楠原 栄樹 Shigeki Kusuvara

しまなみ今治管理センター所長
(前) 長大橋技術センター
防食・耐風グループリーダー

概要

本州四国連絡橋海峡部橋梁の基礎は大規模なマスコンクリートであるが、これらを長期間にわたって健全に維持管理していくためには、劣化要因である塩分や二酸化炭素の侵入を抑制していく必要がある。このため、本州四国連絡高速道路（株）では、「海峡部橋梁マスコンクリート表面被覆要領」を制定し、これに従ってコンクリートの表面被覆を行っている。この度、近年の調査結果を踏まえて要領の改訂を行った。本報告では、これまでの要領の課題、近年の調査検討内容、改訂した要領の概要について報告するものである。

The foundations of the Honshu-Shikoku Bridges are large-scale mass concrete structures. In order to maintain them in a good condition, it is dispensable to prevent intrusion of deterioration factors such as salt, carbon dioxide, etc. For this purpose, surface coatings were applied to many of the foundations according to the “Guideline for Coating of Mass Concrete Structure of Long-Span Bridge.” The Guideline was revised based on recent studies. In this report, issues to be solved in the last Guideline, results of recent studies, and the key points of the revision of the Guideline are explained.

1. はじめに

海峡部橋梁マスコンクリートの塩害・中性化の抑制を目的とした表面被覆の施工については、施工実績や長年にわたる調査結果を踏まえて、平成25年6月に「海峡部橋梁マスコンクリート表面被覆要領」（以下「要領」、又平成25年制定のものを「H25要領」という。）を制定している¹⁾。しかし、H25要領は新設の表面被覆のみを対象としており、維持管理に関しては今後検討することとなっていた。H25要領の制定以降、表面被覆の塗替手法といった維持管理手法の検討に加え、表面被覆に関する様々な調査結果を踏まえて、要領の改訂を行った。

本報告では、要領の改訂を目的とした種々の調査結果と、改訂の概要について紹介する。

2. H25要領の課題

(1) 品質規格の高度化

1) ひび割れ追従性

要領において規定される表面被覆の要求性能は、ゼロスパン試験において2mm（初期塗膜）と、他の同種基準と比較しても大きくなっている。要領では、適用の範囲

をアンカレイジと主塔基礎に限定しているものの、今後より小さい規模のコンクリート構造物にも適用の範囲を広げるとした場合には、現在要求しているひび割れ追従性は過大で不経済となることも懸念される。様々な種類・規模の構造物におけるひび割れ挙動を計測し傾向を把握することにより、より精緻な要求性能が設定できるものと考えられる。

また、要領においては、常温時での伸び性能を確認することになっているが、実際のひび割れ幅の拡大は低温時のコンクリートの収縮によって生じる。そのため、低温時の伸び性能がこのひび割れ開閉量に対応しているかを確認しておく必要がある。

2) 劣化形態の解明

コンクリート表面被覆の劣化形態として、局部的にはがれが顕在化するケースが確認されている。この原因の一つとして、コンクリート内部の水が表面被覆との境界部に供給されることによる付着力低下が想定された。このような劣化メカニズムについて究明し、必要であれば品質規格に加えることが考えられる。

(2) 維持管理要領の確立

H25要領は表面被覆を新規に施工する場合のみを対象としており、維持管理に関する要領の早期の確立が待たれている。特に既設塗膜の塗替え実施の判断基準、塗替え手法については喫緊の課題となっている。

3. 品質規格の高度化に関する検討

3.1 ひび割れ開閉量の調査

コンクリート表面被覆材には、塩分、炭酸ガスなどのコンクリート構造物の劣化因子の浸透を抑制する性能のほか、耐候性、付着性、耐アルカリ性、ひび割れ追従性（伸び性能）が重視されており、要領では被覆材料の伸び性能に2.0mm以上（初期塗膜、20℃）という大きな値を求めている。

マスコンクリートのひび割れは温度変化によって開閉するため、被覆材料に求める伸び性能としては、この開閉量を想定するのが合理的である。本州四国連絡高速道路（株）（以下「本四高速」という。）では過去に海峡部橋梁基礎のマスコンクリートにおいてひび割れの開閉量を計測しているが、計測当時は建設直後であり、温度による開閉以外の要因（乾燥収縮、自己収縮）も含まれていた可能性がある。そこで、完成から十分に年月の経過した基礎構造物においてひび割れ開閉量の計測を行った。調査対象を図－1、表－1にまとめる。

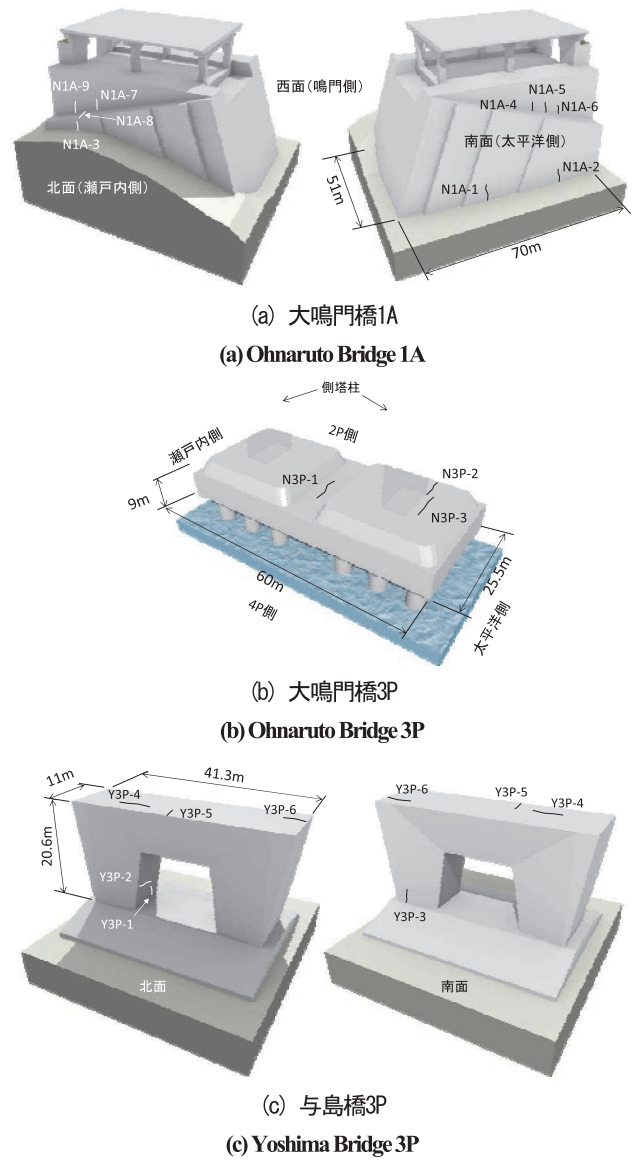
夏季（平成25年8月27日～30日）と冬季（平成26年3月4日～7日）それぞれ48時間連続で亀裂変位計をひび割れ上に設置して計測した。また、夏季と冬季の計測値については、同じひび割れ箇所には標点を設置し、コンタクトゲージで計測を行い、その計測値で補正を行った。

調査結果を図－2に示す。冬季には温度低下に伴いコンクリートが収縮することによりひび割れが開き、夏季には閉じる傾向となった。大鳴門橋1Aの計測箇所は、N1A-1とN1A-4以外は過去にひび割れ補修履歴のある箇所であり（写真－1）、元々非常に大きな開閉が生じていた箇所であるが、今回の計測でも他の構造物のひび割れ開閉量に比べて大きな結果となった。全体的な傾向としては、構造規模の大きさに応じてひび割れ開閉量は大きくなる傾向が見られた。今回調査した構造物のうち、要領の適用範囲となるのは、大鳴門橋1A（アンカレイジ）と大鳴門橋3P（主塔基礎）となる。N1A-8で2mmを超えるひび割れ開閉量が観測されたものの、現在要領で要求している伸び性能2mmはおおむね対象構造物の実態に即していると考えられる。大鳴門橋3Pでは、要求性能を緩和できる可能性が見られるが、要領が想定する主塔基礎は、ケーソン基礎のようなよりマッシブなものであることから、大鳴門橋多柱基礎頂版とは分けて考えるのが妥当と考えられる。

表－1 ひび割れ開閉量計測箇所

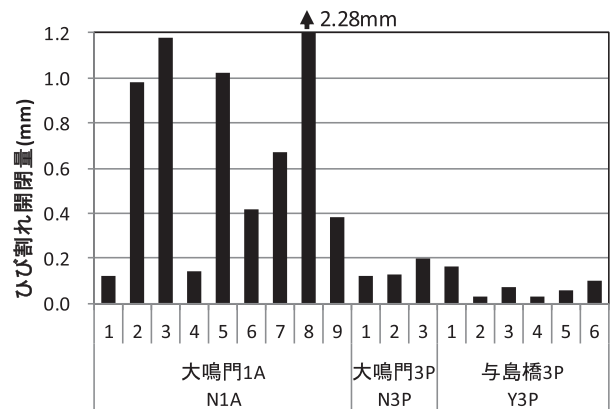
Table 1 Measurement points of crack width expansion

対象構造物	計測箇所	
大鳴門橋1A	基部	N1A-1～3
	上部南面（太平洋側）	N1A-4～6
	上部北面（瀬戸内側）	N1A-7～9
大鳴門橋3P	頂版上	N3P-1～3
与島橋3P	基部	Y3P-1～3
	天端	Y3P-4～6



図－1 ひび割れ開閉量計測位置図

Fig.1 Measurement points of crack width expansion



図－2 ひび割れ開閉量

Fig.2 Crack width expansion



(a) N1A-1 (a) N1A-1
(b) N1A-2 (補修履歴有) (b) N1A-2 (with repair history)

写真-1 計測対象ひび割れ

Photo 1 Measured cracks

3.2 低温下での塗膜伸び性能の調査

実際のコンクリートのひび割れ幅の拡大は低温時に生じることから、H25要領で参考推奨仕様としているポリブタジエン系塗膜、アクリルゴム系塗膜について低温時の伸び性能と耐疲労性について試験を行った。試験は、大鳴門橋のコンクリート表面で実測された最低温度(-1.4℃)に安全側の余裕度を考慮して-5℃で実施した。

(1) 膜厚と伸び性能の関係

対象の塗膜についてゼロスパン試験(試験温度-5℃)を実施した。膜厚と伸び性能の関係を図-3、4に示す。

ポリブタジエン系塗膜では、膜厚が500μmから700μmへ増加すると伸び量が向上するが、膜厚700μmから1,000μmでは大きな差が無いことが分かった。破壊形態は、いずれの膜厚でも引張力の最大値が発生した後、上塗りと中塗りの一部破断となった。全体的に要求伸び性能である2.0mmを大きく下回る結果となった。膜厚500μmでは、0.15mm程度であり、図-2より要領の対象となるマスコンクリート構造物のひび割れ開閉量がおおむねこの値よりも大きくなることを考慮すると、要求性能を満たさない仕様であると考えられる。膜厚1,000μmでは、伸び性能が0.6mm程度であり、ひび割れ開閉量が小さいマスコンクリート構造物に限って適用が可能と考えられる。

アクリルゴム系塗膜の膜厚と伸び性能の関係は、膜厚に比例して伸び性能が向上することが確認され、破壊形態は、引張力最大→上塗り塗膜の一部破断→中塗り塗膜の一部破断の順番となった。参考推奨仕様である膜厚1,000μmについては、-5℃の環境下での伸び量が1.5mm(引張力最大)であったが、外的因子の遮断性に影響する中塗りの一部破断に着目すれば約3mmと高い伸び性能を有することが分かった。

(2) 耐疲労性試験

対象の塗膜について、耐疲労性試験を行った(写真-2)。試験塗膜に一定量で繰り返し伸縮を発生させ、500回ごとに塗膜の割れを目視により確認した。耐疲労性試

験にあたっては、伸縮幅を決める必要があるが、ゼロスパン試験の結果より、ポリブタジエン系塗膜では0.1～0.3mm、アクリルゴム系塗膜では0.5～2.0mmとした。耐疲労性試験の結果を図-5、6に示す。図では、塗膜伸び性能の主要な役割を担う中塗りについての結果のみ示す。

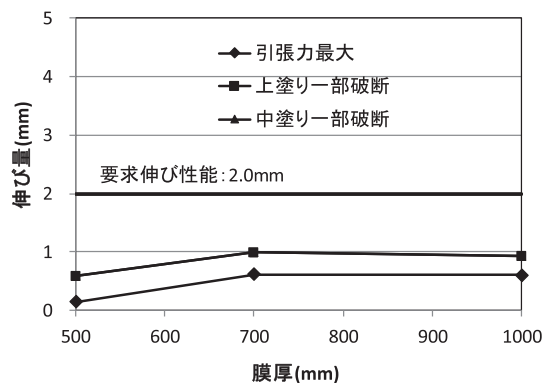


図-3 膜厚と伸び量の関係(ポリブタジエン系)

Fig.3 Stretch vs. thickness (polybutadiene)

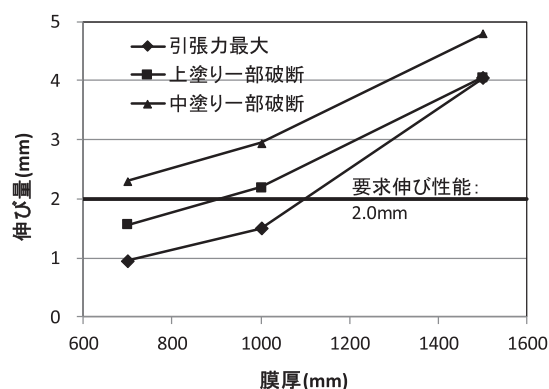


図-4 膜厚と伸び量の関係(アクリルゴム系)

Fig.4 Stretch vs. thickness (acrylic rubber)



写真-2 耐疲労性試験

Photo 2 Fatigue test

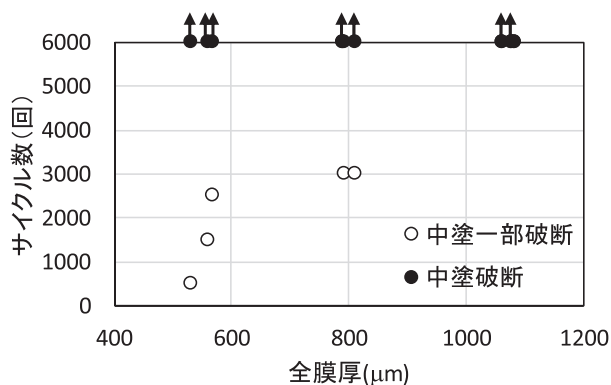


図-5 耐疲労性試験結果（中塗りのみ）
（ポリブタジエン系、伸縮幅：0.1～0.3mm）

Fig.5 Fatigue test result (middle layer only)
(polybutadiene, expansion width: 0.1–0.3mm)

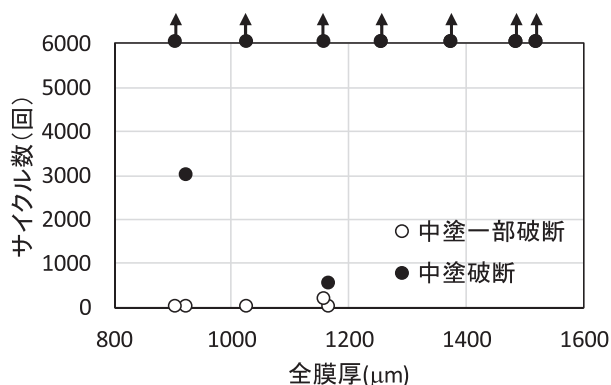


図-6 耐疲労性試験結果（中塗りのみ）
（アクリルゴム系、伸縮幅：0.5～2.0mm）

Fig.6 Fatigue test result (middle layer only)
(acrylic rubber, expansion width: 0.5–2.0mm)

ポリブタジエン系塗膜については、膜厚500μm程度では数千回程度の繰り返し回数で中塗りの一部が破断したが、膜厚1,000μmでは6,000回以上でも中塗りに異常が見られず、膜厚が厚くなれば性能が向上することが確認された。膜厚1,000μmであれば、0.3mm以上の繰り返し伸縮に耐える性能を有していることが分かった。ここで、繰り返し回数は、1日に1回のひび割れ開閉が発生するとした場合に15年で5,500回に相当する。

アクリルゴム系塗膜については、膜厚の増加に伴い、耐疲労性が向上することが確認された。

3.3 コンクリート面から供給される水による塗膜付着力の低下

表面被覆の変状として、初期にふくれが生じ、その後はがれとなるケースが確認されている（写真-3）。こういったふくれについては、内部に水が滞水していることが多く、またこの変状の直下にはひび割れが存在していることが多い。このことから、ひび割れを通してコンクリート内部の水が塗膜との境界部に供給され付着力を

低下させるメカニズムが想定された。このメカニズムの究明のために、室内試験を行った。



写真-3 ふくれからはがれに進行した表面被覆

Photo 3 Peeling progressed from blistering

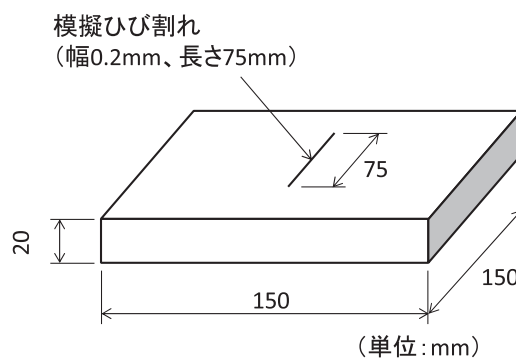


図-7 モルタル基板供試体

Fig.7 Mortar test piece

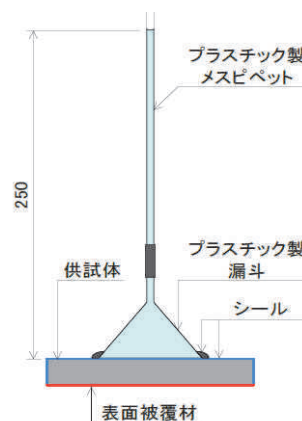


図-8 給水方法

Fig.8 Water feeding method

試験は表面被覆材を塗布したモルタル基板供試体（図-7）の背面からプラスチック製漏斗などを用いてアルカリ水の供給を行った（図-8）。表面被覆材は柔軟型エポキシ樹脂系、ポリブタジエン系とした。またモルタル基板供試体の一部においては、モルタル打設時に供試

体内に設置したテフロン製スリット板を硬化前に引き抜くことによって幅0.2mmの模擬ひび割れを再現した。アルカリ水の供給中は水頭250mmを保つようにした。所定の日数給水した後、付着力を測定した。

結果を図-9に示す。アルカリ水の供給に伴って表面被覆材付着力の低下が確認された。150日間の給水で、柔軟型エポキシ樹脂系は50%、ポリブタジエン系塗膜は40%まで付着力の低下が確認された。

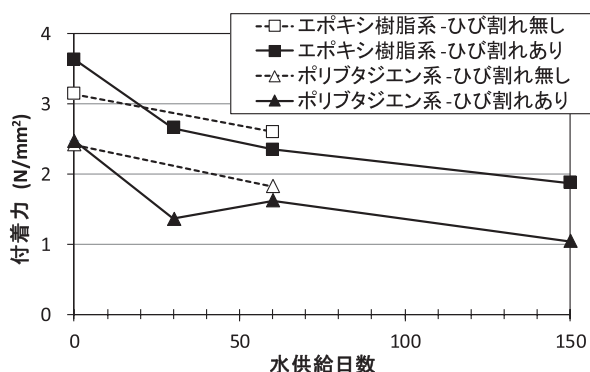


図-9 水の供給による付着力の低下
Fig.9 Degradation of adhesion by water feeding

4. 維持管理要領のための検討

H25 要領は、新規に施工される表面被覆を対象としており、点検、補修などの維持管理については適用の範囲外となっていた。一方で本州四国連絡橋（以下「本四連絡橋」という。）の海峡部橋梁のマスコンクリート表面被覆については、施工からかなりの年数が経過しているものもあり、補修方法などの要領化が喫緊の課題となっていた。そこで、参考推奨仕様のアクリルゴム系塗膜について補修方法の検討を行った。

4.1 アクリルゴム系塗膜の補修方法の検討

本四連絡橋海峡部橋梁に施工されているアクリルゴム系塗膜については、上塗りののがれやわれといった劣化形態が確認されているが、中塗りについては健全であるケースが多い。このような劣化形態に対しては、既存の中塗りをある程度残して新規塗膜を塗り重ねる方法が効率的と考えた。この手法について、現地での試験施工などで確認を行った。

(1) 素地調整手法の検討

既設のアクリルゴム系塗膜をグラインダー（写真-4）又は高圧洗浄（写真-5）によって素地調整を行った後、アクリルゴム系塗膜を塗り重ね、その付着強度を計測して比較を行った。

試験は多々羅大橋 2P（表面被覆施工後 15 年経過）で実施し、表-2 の試験ケースについて実施した。各試験ケースの付着強度を図-10 に示す。



写真-4 グラインダーによる素地調整
Photo 4 Surface preparation by grinder

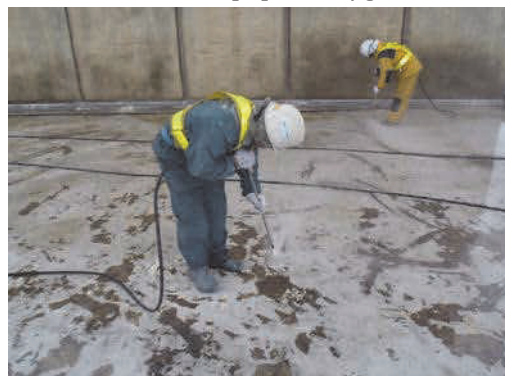


写真-5 高圧洗浄による素地調整
Photo 5 Surface preparation by water jet

表-2 素地調整試験ケース

Table 2 Test cases of surface preparation

No	素地調整方法	上塗り除去程度	塗替塗膜	
			中塗り	上塗り
1	グラインダー	完全除去	-	AU
2			-	AS
3			1 層	AU
4			1 層	AS
5			2 層	AU
6			2 層	AS
7	高圧洗浄	劣化部除去	-	AS
8		完全除去	2 層	AS
9			2 層	AS

AU：アクリルウレタン、AS：アクリルシリコーン

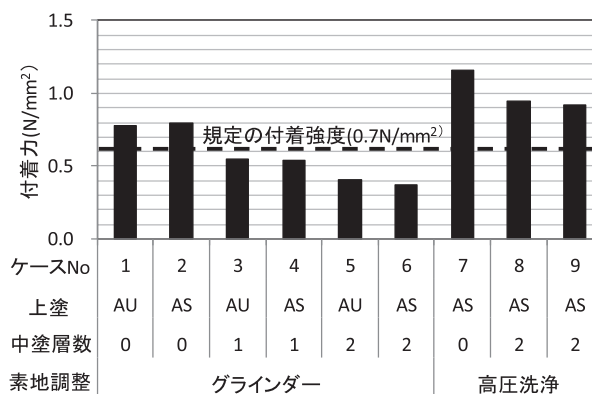


図-10 塗替え塗膜の付着強度
Fig.10 Adhesion of recoated film

グラインダーによる素地調整での付着強度は、初期塗膜の要求性能である $0.7\text{N}/\text{mm}^2$ を満足しない試験体が多かった。高圧洗浄による素地調整では、全ての試験体で $0.7\text{N}/\text{mm}^2$ を満足し、平均で $1.0\text{N}/\text{mm}^2$ となった。

グラインダーによる素地調整は、既設のアクリルゴム表面を乱し、ゴムの削りカス（写真－6）が表面に付着するために塗替え塗膜の付着強度が低下したものと考えられる。高圧洗浄では削りカスなどの付着は発生しないが、上塗りを完全に除去するケース No.9（写真－7）では、洗浄時間が長くなり既設塗膜に剥離などの損傷が発生し、付着強度が低下することが考えられる。また、施工時間については、グラインダーによる素地調整は高圧洗浄で上塗り劣化部のみ除去する方法の数倍の時間を要した。



写真－6 グラインダーの素地調整による削りカス
Photo 6 Residues after surface preparation by grinder



写真－7 高圧洗浄による素地調整
（左：ケース 8、右：ケース 9）
Photo 7 Surface preparation by water jet (left: case 8, right: case 9)

また、同種の試験を樫石島橋 3P でも実施したが、同じ素地調整手法でも、多々羅大橋 2P での試験に比べて付着力が低い結果となった。樫石島橋 3P での剥離形態はほとんどが母材での破壊であり、表面被覆の付着力を評価できるものでは無かった。このことから、塗替えにあたっては、既設塗膜下のコンクリート母材の劣化状態についても調査することが望ましい。

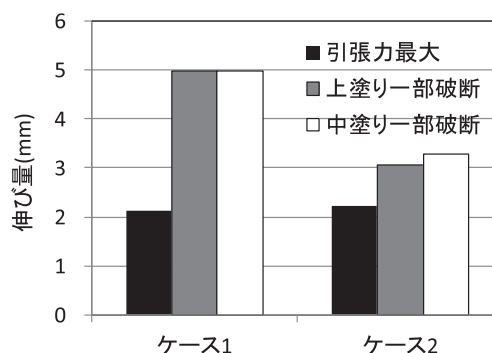
(2) 塗替え仕様の検討

塗替え仕様の検討は、岩黒島橋 3P 橋脚天端のアクリルゴム系塗膜（施工後 26 年経過）に表－3 に示す 2 種類の仕様で塗替えを行い、塗膜を採取して伸び性能で比較を行った。伸び性能試験の結果を図－11 に示す。

表－3 塗替え試験ケース

Table 3 Recoring test cases

No	素地調整 方法	上塗り 除去程度	塗替塗膜	
			中塗り	上塗り
1	高圧洗浄	劣化部除去	1 層	アクリル
2			－	シリコーン



図－11 塗替え仕様の伸び性能
Fig.11 Stretch of recoated film

両仕様とも引張力最大時の伸び量に差が無く、これについては既設塗膜の強度が支配的になっていると考えられる。上塗り、中塗り破断時の伸び量で比較すると中塗り 1 層追加したケース 1 の方が、追加の無いケース 2 より伸び性能が向上しており、追加した中塗りの効果が現れているものと考えられる。

5. 要領の改訂

以上の検討を踏まえ、平成 28 年 11 月に要領の改訂を行った。改訂のポイントについて以下に述べる。

(1) 表面被覆に求める性能

3.1 の調査により、温度が低くなるとひび割れ幅が大きくなり、その変動量は構造物によって異なることが分かった。そのため、従来の性能照査を実施した後、低温時 (-5°C) の伸び性能を確認し、使用可能なマスコンクリート面をひび割れ開閉量によって区分するものとした（表－4）。

表－4 低温時伸び性能と使用区分

Table 4 Low temperature stretch and usage

基準値	使用区分
ひび割れ幅が 0.6mm まで塗膜に欠陥が生じない	ひび割れ開閉量が 0.5mm 未満のマスコンクリート面
ひび割れ幅が 1.5mm まで塗膜に欠陥が生じない	ひび割れ開閉量が 0.5mm 以上のマスコンクリート面

また、3.2 の試験の結果、参考推奨仕様の一つであるポリブタジエン系塗膜については、膜厚 500 μm のものは低温時の伸び性能が低いため、参考推奨仕様から除くこととした。膜厚 1,000 μm のものについては、ひび割れ開閉量が小さいところに限り適用可能とした。

(2) 施工

3.3 に示すとおり、コンクリートのひび割れから表面被覆背面にアルカリ水を供給し付着力を調べた結果、付着力が低下することが分かった。施工における注意点として、漏水が生じているコンクリート面に表面被覆を施工する場合、水抜きなどの対策が必要であることを解説文に記述した。

(3) 維持管理

これまで、新規に施工される表面被覆のみを対象としていたが、維持管理についても対象とすることとした。維持管理についての章を設け、点検、調査、補修・塗替、追跡調査について規定した。点検は長大橋点検の一環として行うものとし、変状の分類、判定については、点検管理要領第2集長大橋点検²⁾を参考に定めた。また、点検の結果変状に応じて調査を行うこととし、過去の施工記録の確認、付着力調査、コンクリート基材の確認などを行うこととした。補修・塗替については変状に応じた留意点などを解説に記述した。また、4.1 の検討を踏まえ、アクリルゴム系の塗替え仕様として、「アクリルゴム系中塗 1 層+上塗り」を標準とし、素地調整については高圧水洗浄を使用し既設塗膜の劣化部を除去する程度とすることを解説に加えた。

覆要領の制定、本四技報、Vol.38、No.121、pp.2-9、2013.9

- 2) 本州四国連絡高速道路株式会社：点検管理要領第2集長大橋点検、2012.4

6. おわりに

この度、マスコンクリート表面被覆について、品質規格の高度化や維持管理について検討を行い、その結果を踏まえて要領の改訂を行った。しかし、表面被覆についてはまだ未解明な部分が多く、より効率的な維持管理を行って行くために更なる検討が必要である。今後取り組むべき課題としては以下があげられる。

- 1) 水の影響による付着力低下メカニズムの解明と、そのような劣化を生じない材料の開発
- 2) 既設塗膜の塗替え実施の判断基準
- 3) 既設ポリブタジエン系塗膜の補修方法
- 4) その他、要領の要求性能を満足する新たな材料の調査

謝辞

本検討にあたっては、本四高速と神戸大学の間で締結されている連携協力協定に基づき、神戸大学森川教授の指導と協力を得ながら実施した。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 荻原勝也、花井拓：海峡部橋梁マスコンクリート表面被

本州四国連絡高速道路の経済効果分析

Empirical Studies of Spatial & Economic Effect of Utilizing the Honshu-Shikoku Bridge
Based on Inter-Regional Input-Output Tables

下元 俊英 Toshihide Shimomoto

総務部 広報課長
(前)企画部 道路経済課長

前島 一陸 Kazumichi Maeshima

神戸管理センター 専門役
(前)企画部 道路経済課長代理

概要

本州四国連絡高速道路（以下「本四高速道路」という。）は、かつてその多くを海上交通に依存してきた本四間の交通条件に、劇的な変化をもたらした。さらに、本州・四国両地域の高速道路ネットワークと接続し、全国に延びる高速交通網の一翼を担う交通インフラとして位置づけられる。その結果、本四間の流動に係る移動時間を大きく短縮し、地域間相互依存関係を通じて、周辺府県のみならず全国各地域にその経済効果が波及しているものと考えられる。

そこで、本四高速道路による貨物及び旅客流動を介した交易が、全国各地域・産業の生産活動にどの程度影響を及ぼしてきたかについて、地域間産業連関表を用いて定量的に把握することとした。

The Honshu-Shikoku bridge has dramatically improved the traffic condition between Shikoku and Honshu, that had ever been depending on sea traffic with most. Furthermore, the Honshu-Shikoku bridge has been connected to the expressway network of both Honshu and Shikoku areas and is now given status as the traffic infrastructure to bear the part of a high speed transportation network extending throughout Japan. As a result, it improves movement time, and it is assumed that the economic effect spreads to not only the prefectures close to the Honshu-Shikoku bridge, but also nationwide each area through spatial interdependency.

To measure these economic effect quantitatively, inter-regional input-output analysis was applied on intermediate inputs. Besides, the economic effect of trip consumption through the Honshu-Shikoku bridge was measured with the Balanced Multiregional Input-Output Model.

1. はじめに

間もなく、瀬戸大橋（昭和63（1988）年開通）によって道路と鉄道で本四間が結ばれてから30年、本四3ルートが概成してから20年を迎える。

この間、時間短縮、随時性・確実性の確保によって、架橋関連地域の生活圏、商圏・取引圏を拡大させた。これらを背景に、生活・文化活動面、経済・産業活動面などで、各地域においてこれまで多岐にわたる効果が現れてきている。また、本四3ルートによる効果は、地域・産業間の取引を介して、架橋関連地域に限らない広域的なエリアにまで波及し、社会・経済に対する構造的変化をもたらしているものと考えられる。

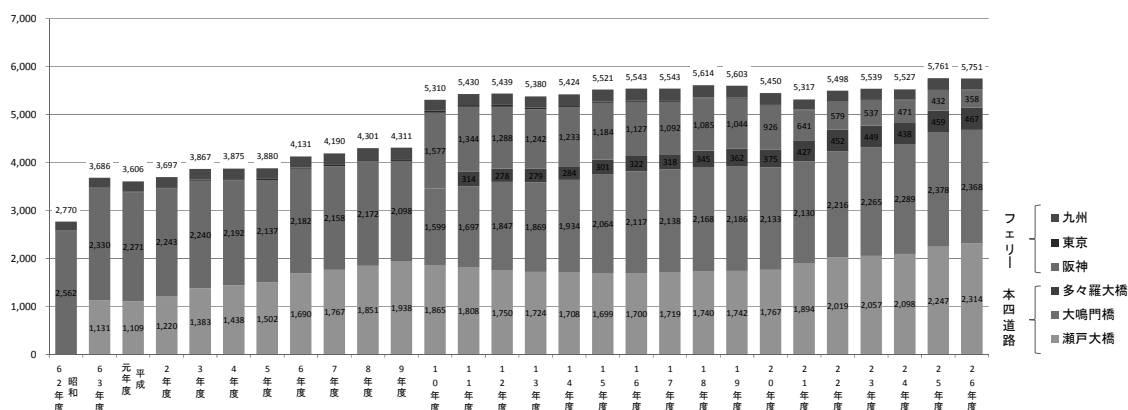
本稿は、本四3ルートが全国の各地域・産業に及ぼしてきた経済波及効果について定量的に把握することを目的とし、産業連関分析の分野でその研究と応用が進められている仮説的抽出法（hypothetical extraction method）の適用を中心に分析した結果をとりまとめたものである。

2. 本四間流動の推移

2.1 貨物流動の推移

本四間のトラック台数について、本州四国連絡高速道路（以下「本四高速道路」という。）利用、フェリー利用と併せてその推移を見ると、フェリーによる航走台数は減少傾向が続いている一方で、本四高速道路利用台数は、瀬戸大橋が供用した昭和63（1988）年と、明石海峡大橋が供用した平成10（1998）年に大きく増加し、その後も増加傾向が続いている。さらに、フェリーによる航走台数と本四高速道路利用台数の合計では、瀬戸大橋、明石海峡大橋がそれぞれ供用した際に大きく増加し、その後も堅調に推移している（図-1）。

そのため、フェリーによる航走台数の減少は、フェリーから本四高速道路に選択経路を変更したことによるものと捉えられるが、本四高速道路による影響はそれに留まらず、本四間の交通条件を大きく改善することで、本四間の貨物流動量を誘発しているものと捉えられる。



(資料) 四国運輸局「四国地方における運輸の動き」より作成

図-1 本四間の本四高速道路・フェリー別トラック台数の推移

Fig.1 Trend of truck Traffic Volume between Honshu and Shikoku

2.2 旅客流動の推移

本四間の旅客流動は、本四架橋供用以降、景気変動等による影響を受けつつも、これまでおおむね増加傾向が続いている(図-2)。特に、瀬戸大橋が供用した昭和63(1988)年と、明石海峡大橋が供用した平成10(1998)年に大きく増加している。平成27(2015)年度には、大鳴門橋開通前の昭和59(1984)年度と比較して約2倍の輸送人員に達している。

3. 本研究の計測対象

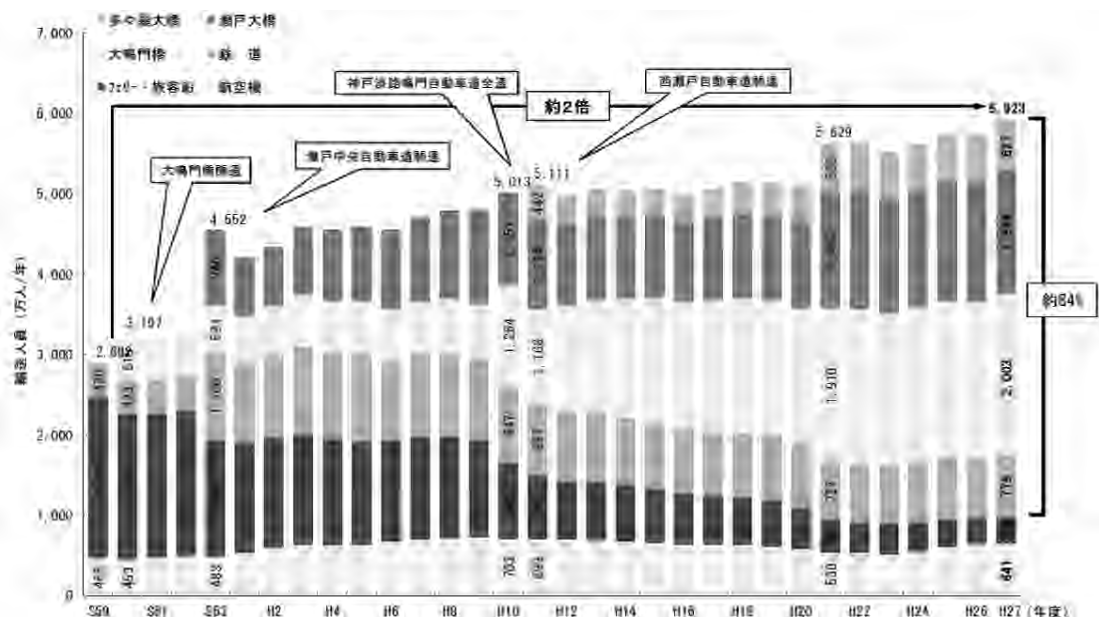
前に示したように、本四間流動において本四高速道路の役割は年々高まっており、地域経済活動に及ぼす影響も大きくなっていると考えられる。本四高速道路を活用

した経済活動に関して、以下に具体例を示す(表-1)。

これらを踏まえ、本四高速道路を経由する流動が地域経済に果たしている役割として、以下の3つの視点で計測することとした。

3.1 貨物流動を介した産業間取引に伴う効果

産業間取引のうち貨物流動を伴う取引としては、第1次産業発及び第2次産業発の取引がそれに当たり、例えば、四国で生産されるLED(第2次産業)について、本四高速道路を通じて本州各地の自動車組み立て工場(第2次産業)や照明器具工場(第2次産業)に輸送されるケースが挙げられる。



(資料) 本州四国連絡高速道路株式会社「本四架橋と私たちの暮らし」

(注釈) 本四高速資料、四国運輸局「四国運輸局業務要覧」などより作成

図-2 本四間の輸送人員の推移

Fig.2 Trend of transport passengers between Honshu and Shikoku

表－1 本四間取引の具体例

Table 1 Specific example of transaction patterns between Honshu and Shikoku

需要 供給	財・サービスの販売			
	第1次産業	第2次産業	第3次産業	最終需要（観光・私用）
財・サービスの投入	第1次→第1次	第1次→第2次	第1次→第3次	第1次→最終需要
	本州の農家で開発された新品種の種・苗を、四国の農家が仕入れて農業生産に活用する場合	高知で取れたトマトを本州の野菜ジュース工場に輸送して、野菜ジュースを生産する場合	徳島で葉っぱや花を収穫し、料理の“つま”として、本州の料亭・旅館に出荷する場合	本州から四国を訪れる観光客が、四国の農産品を購入する場合
	第2次→第1次	第2次→第2次	第2次→第3次	第2次→最終需要
	愛媛で生産した耕運機を、本州の農家に輸送し、農作に活用される場合	徳島で生産したLEDを、本州の照明器具工場に輸送し、照明器具の部品として活用される場合	香川で生産したゴルフ用グローブを、本州のスポーツ品販売業者に輸送する場合	四国から本州を訪れる観光客が、本州の加工食品を購入する場合
	第3次→第1次	第3次→第2次	第3次→第3次	第3次→最終需要
	本州のコンサルタントからコンサルティングを受けて、高知のお茶のブランド化・商品開発を行う場合	本州のデザイン会社で考案されたブランド化のアイデアを、愛媛のタオル製造業が購入する場合	高知で開発された受注支援システムを、本州の小売店舗に提供する場合	本州から四国を訪れる観光客が、四国で飲食し、ホテル・旅館に宿泊する場合

3.2 旅客流動を介した産業間取引に伴う効果

産業間取引のうち旅客流動を伴う取引としては、第3次産業発の取引がそれに当たり、例えば、四国の食品卸売会社（第3次産業）が提供する物流情報システムを四国外の小売店（第3次産業）が導入するケース、あるいは四国外のデザイン会社（第3次産業）が提供する、新たなブランド化のアイデアを四国の製造業（第2次産業）が導入するケースなどが挙げられる。

3.3 観光・帰省など業務以外の目的流動にかかる消費支出に伴う効果

本四高速道路を利用する旅客流動では、業務を目的とした流動の他に、観光・帰省など業務以外（以下「観光・私用」という。）を目的とした流動が含まれる。これらの流動は、目的地での消費を伴うものであり、四国側・本州側の双方において経済効果が顕在化しているものと考えられる。

そこで、本四高速道路を活用した観光・私用目的流動による経済効果についても、本研究にてその計測方法及び計測結果を提示する。

4. 経済効果の計測方法

本四高速道路は、本四間交易を支えることで、四国から本州側の各地域に波及していくスピルオーバー効果、さらに四国から本州側各地域を経由して四国に戻ってくるフィードバック効果など、地域間をまたがる経済波及効果を支えている。これらの背景となる地域間相互依存関係は、これまでの高速交通網の拡充に伴う地域間輸送コストの低下、各地域の産業構造の高度化などに伴い大きく変化してきているものと考えられる。そのため、それぞれ異なった年次を対象とした地域間産業連関表を用いて、経済効果の計測を行うこととした。

また、本研究の計測対象とする、産業間取引による流動、及び観光・私用目的流動について、各流動による経済効果の発現過程を踏まえ、適用する計測方法をそれぞれ以下のとおりとした（表－2）。

表－2 取引関係別の経済効果計測方法の概要

Table 2 Summary of the method of the economic effect measurement according to the transaction patterns

需要（着） 供給（発）		財・サービス販売			最終需要 （観光・私用）
		産業間取引（中間需要）			
		第1次産業	第2次産業	第3次産業	
財・サービス投入	第1次産業	仮説的抽出法 （産業間貨物流動）			均衡産出高モデル 〔観光・私用目的 旅客流動〕
	第2次産業				
	第3次産業	仮説的抽出法 （産業間旅客流動）			

4.1 仮説的抽出法による効果算出

産業間貨物・旅客流動による経済効果の計測では、「仮説的抽出法」（hypothetical extraction method）を、本四間の産業間取引を対象に適用することとした。

(1) 関連する既往研究

玉村・内田・岡本(2003)¹⁾によれば、「仮説的抽出法」の基本的考え方について、つぎのように説明している。

「仮説的に（hypothetically）ある産業部門あるいは国を抽出する（extract）というものである。つまり、抽出された部門（または国）を除いた残りの部門（国）での産業連関モデルと抽出する前の産業連関モデルを比較することにより、経済システムにおける抽出部門（国）の働きを浮き彫りにする方法である」、と。

このような「仮説的抽出法」^{1) 2)}については、既に幾つかの実証分析に適用されている。例えば、公益財団法人中部圏社会経済研究所³⁾では、『中部圏地域間産業連関表(2005年版)』の10地域95部門表を用いて、仮説的抽出法を適用し、中部圏の自動車産業を抽出した場合の他産業への影響率を計測している。また、経済産業省⁴⁾では、わが国と多くの国・産業との間で国際産業連関構造が広がっている電気機械産業、自動車産業を対象に、特に強い連関効果がわが国とどの国のどの産業との間で広がっているかを計測している。

(2) 本研究における仮説的抽出法の適用

本研究では、上記に示した仮説的抽出法の考え方、及び計測手法を参考にしつつ、特定の産業部門あるいは地域を抽出するのではなく、本四間交易のうち、とくに本

四高速道路利用分を抽出（extract）することによって、本四高速道路の働きを“浮き彫りにする”ことを目的として計測を行った。すなわち、「本四架橋がない」ことを「本四高速道路利用分だけ本四間交易が抑制される」と捉え、仮説的抽出法を適用することとした。

計測にあたり、現状（本四高速道路がある状態）の生産額と、仮説的抽出法の適用によって求められる本四高速道路がない状態の生産額を比較し、両者の差をもって本四高速道路の効果として整理することとした。

4.2 均衡産出高モデルによる効果算出

観光・私用を目的とした流動に関して、本四高速道路の有無による最終需要の変化を伴う経済効果については、最終需要を固定し、仮説状態を表現した逆行列係数表を用いて計測する方法である上記の仮説的抽出法では計測ができない。

そのため、観光・私用を目的として本四高速道路を経由する旅客流動にかかる消費額（最終需要）をインプットデータとし、均衡産出高モデル²⁾により、すなわち消費額に地域間産業連関表から得られるレオンチェフ逆行列を乗じて、経済波及効果を算出することとした。

5. 産業間貨物流動による経済効果の算出

貨物流動にかかる効果では、産業間取引のうち、第1次産業発及び第2次産業発の取引が対象となるが、本四高速道路がない場合に、本四間交易がどの程度抑制されるかを定量的に整理するため、貨物品目別に、本四間貨物金額のうち本四高速道路が支えている貨物金額の割合を、本四高速道路の分担率として整理した。

まず、品目別の本四間貨物流動量、そのうち本四高速道路による貨物流動量を整理した。次に、これに品目別の貨物単価を乗ずることによって、本四間貨物金額、本四高速道路貨物金額を求めた。

5.1 分析対象とする貨物流動量の整理

本研究では、四国と他の各地域間の貨物流動における本四高速道路の分担率の算出にあたり、貨物地域流動調査、及び本四間フェリー利用トラック台数と本四高速道路利用トラック台数を用いることとした。

貨物地域流動調査では、輸送機関（鉄道、海運、自動車）別の都道府県間・品目別貨物流動量が整理されている。ただし、貨物地域流動調査では、「フェリー」は「自動車」に含まれるものと定義されている。一方、本四間のトラック台数に関して、四国運輸局では、本四間フェリー利用トラック台数及び本四高速道路利用トラック台数が、それぞれ整理されている。

そこで、貨物地域流動調査における本四間の「自動車」による流動量を、フェリー利用トラック台数と本四高速道路利用トラック台数の割合で按分することにより、本四高速道路を利用する貨物流動量として算出した。

5.2 本四高速道路分担率の計測

地域間産業連関表は、金額ベースで地域間交易額が整理されている。そのため、金額ベースで本四高速道路分担率を導出するべく、貨物流動量に貨物単価を乗じて、輸送機関別の貨物金額を整理することとした。

(1) 貨物単価の算出

まず貨物単価（重量あたり金額）を算出した。5年ごとの産業連関表（全国）より得られる部門別生産額を、貨物地域流動調査から得られる品目別貨物量（全国計）で除して貨物単価を求めた。産業連関表データが得られない場合には、5年ごとに求めた貨物単価を直線補間することによって整理した。

(2) 本四高速道路分担率の算出

続いて、貨物単価を本四間の輸送機関別貨物量に乘じて、本四間貨物流動の輸送機関別金額換算値を求めた。さらに、求めた輸送機関別金額換算値を基に、四国発各地域着、各地域発四国着のそれぞれについて、総貨物金額に対する本四高速道路による貨物金額の割合を、本四高速道路分担率として整理した（表－3）。

表－3 貨物流動における本四高速道路の分担率（平成 23 年）

Table 3 Shares of the The Honshu-Shikoku bridge in the freight flow (2011)

品目	四国⇒他地域										他地域⇒四国									
	北海道	東北	関東	中部	近畿	中国	四国	九州	沖縄		北海道	東北	関東	中部	近畿	中国	四国	九州	沖縄	
穀物、野菜・果物、その他の農産物	0.0%	86.7%	86.0%	85.4%	86.5%	86.4%	85.5%	81.3%	0.0%	0.0%	0.0%	—	85.0%	64.1%	39.3%	42.9%	85.5%	17.3%	—	—
畜産品	0.0%	—	86.8%	—	86.5%	86.5%	86.6%	85.2%	—	—	—	—	86.2%	86.6%	86.7%	86.6%	—	—	—	—
水産品	0.0%	—	86.7%	86.7%	86.7%	86.6%	83.9%	86.3%	—	—	—	—	86.7%	86.7%	86.5%	86.7%	83.9%	84.3%	—	—
林産品	0.0%	0.0%	84.3%	79.5%	81.8%	60.4%	86.2%	79.8%	0.0%	0.0%	0.0%	31.6%	78.9%	71.8%	74.7%	86.2%	24.5%	0.0%	—	—
鉱産品	0.0%	5.5%	0.1%	0.0%	1.8%	10.8%	81.6%	1.9%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	4.1%	5.6%	3.0%	81.6%	0.0%	0.0%	—	—
鉄鋼	0.0%	0.0%	8.4%	27.3%	26.5%	76.4%	81.7%	3.3%	0.0%	0.0%	0.0%	18.4%	39.2%	44.9%	12.8%	81.7%	11.2%	—	—	—
非鉄金属	0.0%	0.0%	0.0%	50.4%	27.0%	46.0%	86.3%	81.9%	—	—	0.0%	0.0%	82.3%	62.0%	85.2%	86.3%	79.3%	—	—	—
金属製品	0.0%	85.7%	80.5%	85.6%	61.9%	65.2%	82.8%	52.1%	0.0%	0.0%	82.4%	4.6%	85.5%	64.6%	79.2%	82.8%	56.0%	—	—	—
機械	0.0%	0.0%	65.1%	74.2%	72.2%	64.5%	84.4%	30.4%	0.0%	0.0%	84.5%	3.5%	6.1%	57.4%	78.6%	84.4%	76.8%	0.0%	—	—
セメント、その他の窯業品	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	29.5%	68.4%	85.3%	0.8%	0.0%	0.0%	—	86.0%	85.7%	33.6%	36.8%	85.3%	5.2%	—	—	—
石油製品	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.2%	2.9%	78.7%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	1.2%	0.0%	3.1%	6.4%	78.7%	0.0%	0.0%	—	—
石炭製品	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	—	—	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	—	—	—
化学製品	0.0%	0.0%	12.4%	0.0%	28.6%	6.6%	84.6%	17.7%	0.0%	0.0%	0.0%	15.7%	13.2%	37.9%	4.4%	84.6%	36.8%	—	—	—
化学肥料	0.0%	0.0%	0.0%	—	58.8%	0.0%	86.1%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	63.8%	72.2%	86.1%	65.0%	—	—	—
その他の化学工業品	0.0%	86.7%	62.4%	84.3%	81.6%	86.4%	81.7%	82.5%	0.0%	—	0.0%	47.7%	83.9%	84.6%	85.1%	86.1%	86.3%	0.0%	—	—
紙・パルプ	0.0%	86.7%	50.8%	86.1%	67.0%	82.9%	86.4%	73.8%	0.0%	0.0%	0.0%	84.4%	85.4%	79.1%	84.4%	86.4%	79.9%	—	—	—
繊維工業品	0.0%	—	85.4%	86.3%	77.3%	84.5%	86.2%	—	0.0%	—	—	85.1%	85.9%	83.3%	86.6%	86.2%	—	—	—	—
食品工業品	0.0%	53.0%	72.5%	68.1%	84.6%	86.5%	84.9%	80.6%	0.0%	0.0%	0.0%	84.3%	52.7%	86.0%	86.5%	84.9%	86.3%	—	—	—
日用品	0.0%	86.4%	86.3%	86.1%	86.0%	85.5%	86.0%	86.4%	0.0%	—	86.7%	86.4%	86.2%	85.7%	86.1%	86.0%	86.1%	—	—	—
その他の製造工業品	0.0%	0.0%	85.2%	86.3%	85.5%	85.8%	86.4%	—	0.0%	—	76.6%	85.2%	86.1%	84.8%	86.1%	86.4%	—	—	—	—
動植物性飼料	0.0%	0.0%	60.5%	—	86.2%	3.3%	85.7%	79.6%	0.0%	0.0%	0.0%	73.9%	78.8%	49.3%	84.6%	85.7%	84.5%	—	—	—
その他の特種品	0.0%	0.0%	84.5%	86.1%	72.1%	64.7%	86.2%	49.2%	0.0%	0.0%	0.0%	55.9%	77.4%	68.4%	80.2%	86.2%	69.9%	0.0%	—	—
その他	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	—	—	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	0.0%	—	—	—

（資料）国土交通省「貨物地域流動調査」、四国運輸局「四国地方における運輸の動き」、総務省統計局「全国産業連関表」より作成

5.3 産業間貨物流動による経済効果の算出結果

以上から得られる本四高速道路分担率に基づいて、本四高速道路がない場合の中間投入係数を整理し、仮説的抽出法を適用することによって、本四高速道路がない場合の生産額を算出した。さらに、現状の生産額との差によって、本四高速道路を経由する産業間貨物流動による経済効果を算出した。

計算結果によれば、平成 2(1990)年で約 2 兆円の効果であったが、平成 23 (2011) 年では、約 5 兆 8 千億円と大きく増加した(図-3)。産業部門別に見ると、第 2 次産業でその効果が大きく現れるという結果となった。

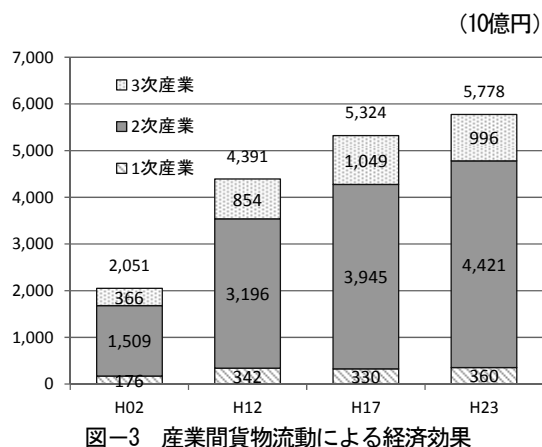


図-3 産業間貨物流動による経済効果

Fig.3 Economic effect by the freight flow between the industry

6. 旅客流動による経済効果の算出

6.1 旅客流動による経済効果算出の概要

本研究の計測対象とする、第 3 次産業発旅客流動、及び観光・私用目的流動について、各流動による経済効果の発現過程を踏まえ、適用する計測方法をそれぞれ以下の算出フロー(図-4)のとおりとした。

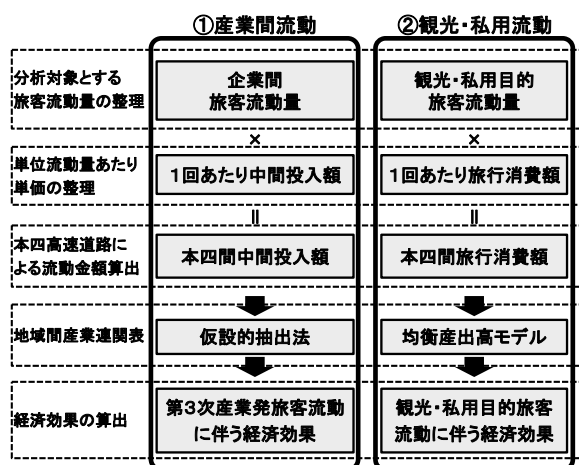


図-4 旅客流動による経済効果の算出フロー

Fig.4 Calculation flow of the economic effect of the passenger flow

まず、本四高速道路を利用する旅客流動のうち分析対象とする旅客流動量として、産業間旅客流動量、観光・私用目的旅客流動量を整理する。

産業間旅客流動による経済効果は、産業間旅客流動量に流動 1 回あたり中間投入額を掛けて、本四間の産業間旅客流動に伴う金額を算出する。

また、単位流動量あたり単価として、第 3 次産業発旅客に関する流動 1 回あたり中間投入額、観光・私用目的旅客に関する流動 1 回あたり消費額を整理する。

旅客流動量に、対応する単位流動あたり単価を掛けることによって、本四間流動金額を算出することができる。

これらを基に、産業間旅客流動については、貨物流動と同様の仮説的抽出法によって、また観光・私用目的旅客流動については、均衡産出高モデルによって、それぞれ経済効果を算出することとした。

なお、仮説的抽出法と均衡産出高モデルは異なる手法であるため、それぞれの手法を用いた算出結果の合計を求めることは適切ではない。

6.2 計測対象とする旅客流動量の整理

本四高速道路通行旅客流動量、またそのうち、分析対象とする業務目的旅客流動量及び観光・私用目的旅客流動量については、図-5 のように位置づけられる。以下、各流動量について、算出方法を示す。



図-5 計測対象とする旅客流動

Fig.5 the Calculation target of the passenger flow

(1)移動を目的とした旅客流動量

旅客流動をベースに、本四高速道路による効果を把握する。まず、本四高速道路を通行する旅客流動量のうち、移動を目的とした旅客流動量を対象とするため、運輸部門(貨物トラックのドライバー)を除いた、移動を目的とした旅客流動量を整理した。

(2)業務、観光・私用目的の旅客流動量

続いて、目的別流動量のうち、業務目的及び観光・私用目的の流動量について、全国幹線旅客純流動調査から得られる、本四間の輸送機関別・目的別流動割合を用いて整理した。

(3)研究開発、第3次産業発の旅客流動量

業務目的流動量では、発産業として、第1次産業から第3次産業までが含まれるが、本研究では、このうち第3次産業発流動については全ての流動を対象とする。一方、第1次・第2次産業発旅客流動は、貨物流動に付随するものと捉え、対象としないものとする。ただし、第1次・第2次産業発旅客流動の中でも研究開発を目的とする旅客流動については、産業連関表における定義に従い、研究開発部門として計上する。

(4)業務目的流動における発部門別流動割合

業務目的流動における発部門別流動割合は、既存統計などから把握することは難しいことから、web アンケート結果より求めた。具体的にはアンケート結果から得られる、仕事を目的とした本四高速道路利用者の「回答者数×頻度」に対する、第1次・第2次産業発かつ研究開発を目的とする利用者の「回答者数×頻度」の割合、また第3次産業を発産業とする利用者の「回答者数×頻度」の割合を用いている。本研究では、回収 40,000 サンプルから抽出された 10,000 サンプルより、これらの割合を整理した。なお、ここで求めた発部門別流動割合は、本研究の対象期間を通じて変わらないものと仮定した。

(5)業務を目的とする発部門・各地域間別流動量

上記より得られた各地域間・業務目的流動に占める発部門別割合を、本四高速道路通行・目的別・地域間旅客流動量のうち業務分に掛けることによって、業務を目的とする発部門・各地域間別旅客流動量を整理した。

6.3 産業間旅客流動による経済効果の算出

(1)1回あたり中間投入額

本業務で用いる仮説的抽出法は、産業間の中間投入額を対象として仮説を設定し、分析を行うものである。そのため、仮説的抽出法の概要を念頭に、業務目的による移動の1回（1往復）あたり中間投入額を算出する。

各産業部門*i*について、雇用者所得水準 R_{in} が高い従業者*n*ほど、中間投入額 A_{ino} も大きいと考えられる。また、産業連関表によれば、産業部門*i*によって、中間投入 a_i と雇用者所得 r_i の比率 a_i/r_i も異なる。そこで、産業部門*i*の各従業者による中間投入額 A_{ino} を、以下のように設定する。

$$A_{ino} = R_{in} \cdot a_i / r_i \quad (1)$$

この中間投入額について、移動先で、滞在日数 day_n 分だけ投入されるとすると、移動1回あたり中間投入額 A_{in} は次のようになる。

$$A_{in} = A_{ino} \cdot day_n / 240 \quad (2)$$

ただし、年間従業日数を240日と仮定する。

最後に、本四間の発産業部門別の1回あたり中間投入額の導出にあたり、中間投入額 A_{in} 、移動頻度 F_{in} は、従業者によって異なるため、各従業者の移動頻度 F_{in} で加重平均する必要がある。そこで、本四間の発産業部門別に、1回あたり平均中間投入額 $A_{i,avr.}$ を、次の計算式にて求めた（表-4）。

$$A_{i,avr.} = \frac{\sum_{n=1}^N (F_{in} \cdot A_{in})}{\sum_{n=1}^N (F_{in})} \quad (3)$$

表-4 本四間業務目的流動の1回あたり平均中間投入額
Table 4 The mean intermediate input per once of the duties purpose flow between Honshu and Shikoku

(万円/回)		
地域間	研究開発	第3次産業
近畿→四国	28.2	12.5
中国→四国	15.6	9.8
四国→近畿	43.9	14.0
四国→中国	16.4	6.7

(資料) アンケート結果より作成

(2)発産業部門別中間投入額の算出

各地域間における発部門別旅客流動量の2分の1に、1回あたり中間投入額（表-4）を掛けることにより、各地域間・発部門別中間投入額（表-5）を算出した。

表-5 各地域間・発部門別中間投入額(百万円/年)

Table 5 The intermediate input between each area and each input sector

部門	地域間	H02	H12	H17	H23
研究開発	近畿→四国	229	455	806	1,300
	中国→四国	110	322	302	494
	四国→近畿	1,827	4,278	4,765	10,363
	四国→中国	299	1,035	666	1,231
	小計	2,463	6,090	6,539	13,388
第3次産業	近畿→四国	8,763	17,437	30,908	49,854
	中国→四国	6,599	19,395	18,182	29,736
	四国→近畿	12,089	28,310	31,538	68,581
	四国→中国	4,769	16,541	10,634	19,674
	小計	32,220	81,684	91,262	167,845
合計	近畿→四国	8,991	17,892	31,714	51,154
	中国→四国	6,709	19,718	18,484	30,230
	四国→近畿	13,916	32,588	36,303	78,944
	四国→中国	5,068	17,577	11,300	20,905
	合計	34,683	87,774	97,801	181,233

(資料) 本州四国連絡高速道路株式会社資料、国土交通省「全国幹線旅客純流動調査」、アンケート結果より作成

(3)産業間旅客流動による経済効果の算出結果

求めた各地域間・発部門別中間投入額を踏まえ、本四高速道路がない場合の中間投入係数を整理し、仮説的抽出法を適用することによって、本四高速道路がない場合の生産額を算出した。さらに、現状の生産額との差によって、本四高速道路を経由する産業間旅客流動による経済効果を算出した。

本四高速道路を経由する産業間旅客流動に伴う経済効果の拡大状況について見ると、平成 2(1990)年で約 5 百億円の効果であったが、平成 23 (2011) 年では、約 2 千 8 百億円と大きく増加した(図-6)。産業部門別に見ると、第 3 次産業でその効果が大きく現れるという結果となった。

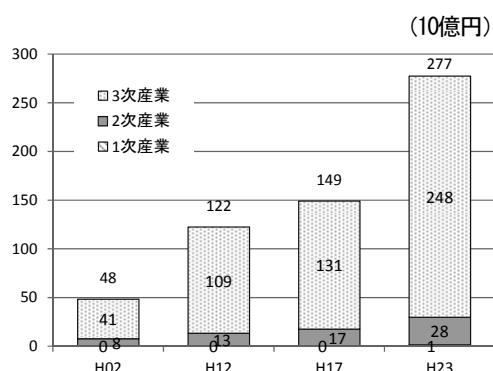


図-6 産業間旅客流動による経済効果

Fig. 6 Economic effect by the passenger flow between the industry

(4)産業間貨物・旅客流動全体による経済効果の算出結果

本四高速道路を利用する産業間貨物流動・旅客流動の双方を同時に仮説的抽出法に適用し、本四高速道路を経由する産業間貨物・旅客流動全体を対象とした経済効果を算出した。

計測結果(図-7)によると、貨物流動のみを対象とした場合、旅客流動のみを対象とした場合と同様に、年々効果額が増加傾向にあり、平成 2 (1990) 年で約 2 兆 820 億円の効果であったが、平成 23 (2011) 年では 6 兆 350 億円の効果があるものと算出された。

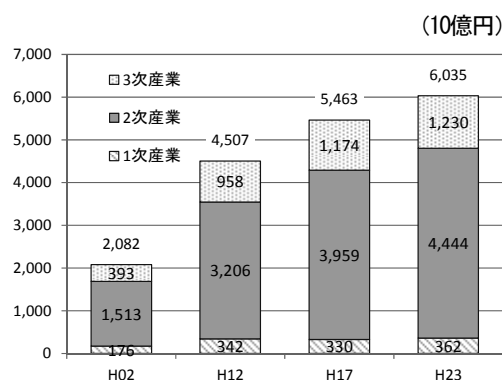


図-7 産業間貨物・旅客流動全体による経済効果

Fig. 7 Economic effect by the freight and passenger flow between the industry

6.4 観光・私用目的流動による経済効果の算出

(1)観光・私用における 1 回あたり消費単価の算出

観光庁による「旅行・観光消費動向調査」のうち、「宿泊の有無(2区分)、主目的地(10区分)、居住地(10区分)別 延べ旅行者数 — 国内旅行」、「宿泊の有無(2区分)、主目的地(10区分)、居住地(10区分)別 旅行消費額 — 国内旅行」より、観光・レクリエーション、帰省・知人訪問等それぞれの 1 回あたり消費額を、地域間別に整理した。なお、本研究では「帰省・知人訪問等」を私用移動と位置づけた。

また、平成 17 (2005) 年以前の単価については、家計調査の「1 世帯当たり年平均 1 か月間の支出—二人以上の世帯」にある、「教養娯楽サービス」の推移より、平成 23 (2011) 年に対する水準を反映した。

整理した結果は表-6 のとおりである。

表-6 本四高速道路利用旅客の目的・地域間別消費単価 (円/回)

Table 6 Consumption unit price of the Honshu-Shikoku bridge use traveler, of each purpose and between each area

目的	地域間	H02	H12	H17	H23
観光	近畿→四国	36,324	38,720	38,226	36,185
	中国→四国	29,196	31,122	30,726	29,084
	四国→近畿	49,275	52,526	51,857	49,087
	四国→中国	29,289	31,222	30,824	29,177
私用	近畿→四国	33,993	36,236	35,774	33,863
	中国→四国	27,323	29,126	28,754	27,218
	四国→近畿	46,114	49,156	48,530	45,937
	四国→中国	27,410	29,219	28,846	27,305

(資料)観光庁「旅行・観光消費動向調査」、総務省統計局「家計調査」より作成

(2)観光・私用消費額の算出

観光・私用を目的とした旅客流動量の 2 分の 1 に、1 回あたり消費単価(表-6)を掛けることによって、本四高速道路利用旅客の目的・地域間別消費額(表-7)を算出した。

さらに、以上から得られた消費額について、観光庁による「旅行・観光産業の経済効果に関する調査研究報告書」(2011 年版)より得られる産業部門別観光消費額に基づいて、部門別消費額に割り振った。また、平成 17 (2005) 年以前の観光消費額の部門別割合は、この割合に準ずるものとして計算した。

表ー7 本四高速道路利用旅客の目的・地域間別消費額(百万円)

Table 7 Consumption Expenditure of the Honshu-Shikoku bridge use traveler, of each purpose and between each area

部門	地域間	H02	H12	H17	H23
観光	近畿→四国	2,239	20,252	52,495	68,107
	中国→四国	1,316	28,875	29,753	43,446
	四国→近畿	9,219	27,131	57,551	85,692
	四国→中国	2,167	29,369	59,986	41,134
	小計	14,942	105,626	199,786	238,379
私用	近畿→四国	11,537	9,310	14,231	40,900
	中国→四国	7,439	5,559	6,123	13,795
	四国→近畿	17,271	14,819	14,880	49,250
	四国→中国	8,289	11,323	5,426	14,431
	小計	44,536	41,011	40,660	118,376
合計	近畿→四国	13,776	29,562	66,727	109,007
	中国→四国	8,755	34,433	35,876	57,241
	四国→近畿	26,490	41,950	72,431	134,942
	四国→中国	10,456	40,692	65,412	55,565
	合計	59,478	146,637	240,446	356,755

(資料) 本州四国連絡高速道路株式会社資料、国土交通省「全国幹線旅客純流動調査」、観光庁「旅行・観光消費動向調査」、総務省統計局「家計調査」より作成

(3)観光・私用目的流動による経済効果の算出結果

近畿⇄四国、中国⇄四国間の観光流動に伴う観光消費額をインプットデータとして、地域間産業連関表を用いて作成した均衡産出高モデルにより、観光消費に伴う経済波及効果を求めた。なお、仮説的抽出法による計算とフェーズをそろえるため、一次波及効果までを対象とした。

計算結果(表ー8)によれば、旅行消費額に伴う経済波及効果は増加傾向にあり、平成 23(2011)年で 6,270 億円と算出された。

表ー8 本四間観光・私用目的流動による地域別経済波及効果
Table 8 The Economic effect according to the area of the Honshu-Shikoku bridge use traveler of Sightseeing or Private purpose

	H02	H12	H17	H23
北海道	764	1,290	3,006	4,924
東北	1,051	2,002	3,971	6,129
関東	7,098	18,215	33,357	48,822
中部	2,986	6,935	12,687	19,872
近畿	40,465	68,591	117,887	209,741
中国	16,058	57,913	96,286	88,386
四国	29,496	82,832	134,947	234,512
九州	2,156	5,179	9,900	14,646
沖縄	113	157	216	341
合計	100,187	243,113	412,257	627,374

(資料) 本州四国連絡高速道路株式会社資料、国土交通省「全国幹線旅客純流動調査」、観光庁「旅行・観光消費動向調査」、総務省統計局「家計調査」より作成

7. おわりに

本研究では、本四高速道路を利用する物流及び人流に照準を定め、その利用に伴う経済的な波及の総効果を計量的に把握したものである。

もとより、本四高速道路の開通後には、輸送モードの転換、すなわち、フェリー利用の一定割合が本四高速道路の利用にシフトしているほか、本四間の旅客流動を誘発している。そのことにより、貨物流動とあいまって、四国と本州側での各地域間の様々な BtoB、BtoC の取引を支え、全国各地域の経済活動に影響を及ぼしている。

本研究によれば、平成 23(2011)年時点で、企業間取引を支えることで、約 6 兆 350 億円。また観光・私用目的移動に伴う消費活動を支えることで、6,270 億円の及ぶ経済効果があるものと見込まれる。

なお、本研究での経済効果の計測と分析は、平成 23(2011)年までを対象としたものとなっているが、その後の本四高速道路の利用に伴う交通量の増加を配慮すれば、その生産誘発額の規模や影響の及ぶ範囲は、引き続き拡大傾向が続くものと想定される。

謝辞

本調査の実施にあたり、計測手法、開発した計測方法の確認などについて、中部圏社会経済研究所 井原健雄研究顧問、岡山大学大学院 中村良平 教授からご指導を仰ぎつつ行なった。深甚なる感謝を申し上げる次第である。

参考文献

- 1) 玉村千春、内田陽子、岡本信広：アジア諸国の生産・需要構造と貿易自由化ーアジア国際産業連関分析一、アジア経済、pp.128-148、2003
- 2) Miller, R.E. and P.D. Blair, Input-Output Analysis : Foundations and Extensions, Second Edition, Cambridge, 2009
- 3) 公益財団法人 中部圏社会経済研究所：中部圏地域間産業連関表(2005 年版)の活用～原表の活かし方と実証分析の例示～、2013
- 4) 経済産業省：通商白書 2006 年版、2006
- 5) 石倉智樹、横松宗太：公共事業評価のための経済学、コロナ社、2013
- 6) 黒岩郁雄：東アジアの国際産業連関と生産ネットワーク、平塚編 東アジアの挑戦 第 5 章、アジア経済研究所、2006
- 7) 濱田禎、下元俊英、前島一陸、遠香尚史：本四高速道路の利用に伴う経済効果 ー仮説的抽出法による計測一、土木計画学研究発表会・講演集、Vol. 54、2016
- 8) 濱田禎、下元俊英、前島一陸、遠香尚史：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～、土木計画学研究発表会・講演集、Vol. 55、2017
- 9) 経済産業省経済産業政策局調査統計部：平成 17 年地域間産業連関表ー作成結果報告書一、2010

孫崎高架橋支承補修に伴う挙動調査

Behavior of the bearings of the Magosaki Viaduct before and after the rehabilitation

新野 貴大 Takahiro Shinno

鳴門管理センター
橋梁維持課

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

孫崎高架橋(写真-1)は、大鳴門橋の四国側の取付高架橋で供用後32年が経過している。鳴門海峡に面した腐食環境の厳しい場所に位置する橋長134mの鋼3径間連続非合成鉄桁橋で、14主桁を有するため、部材数や塗装面積が大きく、平成11年度に塗替塗装を実施したものの、主桁フランジ添接部に多くの腐食が発生している。特に支承(BP-A支承)の腐食が顕著(写真-2)で、中間橋脚の可動支承28基(14基×2橋脚)の機能が腐食堆積物等の固着により固定化しており、この状態ではレベル2地震動時に柱のせん断力に対する耐荷力が不足することを確認している。本文では、中間橋脚にある固定化した28基の可動支承の機能回復を図るために実施した外観調査、上沓の交換及び下沓の防せい工と、支承補修前後に実施した挙動調査結果について報告する。

Magosaki Viaduct, south approach of the Ohnaruto Bridge, is 3-span continuous and non-composite steel girder bridge with the total length of 134m. Since the viaduct has 14 main girders, surface painting area is large. Although repainting was implemented in 1999, since the viaduct is located near the Naruto Channel, increase of corrosion in steel members was reported 32 years after the completion. In particular, the bearings (BP-A bearing) are severely corroded, and 28 movable bearings of 2 intermediate piers (14 bearings on each pier top) were found to be non-functioning due to the accumulation of corroded products between top and bottom bearing components. If the situation is left unchanged, the intermediate piers cannot bear the shear force when the viaduct is subjected to Level 2 Earthquake Ground Motion. In this article, the preliminary study, the rehabilitation works of the bearings(replacement of the top bearing, Zinc and Aluminum thermal spray coating of the bottom bearing), and the investigation of the behavior of the bearings are described.



写真-1 孫崎高架橋

Photo 1 Magosaki Viaduct



写真-2 補修前の支承

Photo 2 Bearing before repair

1. はじめに

孫崎高架橋の支承は、5Aが固定支承であり、中間橋脚M1P・M2P及びM3Aが可動支承(BP-A支承)である(図-1、図-2)。平成22年度に耐震補強工事を実施した直後、5A(固定支承)に設置した変位制限装置が損傷し、このときの調査で中間橋脚M1P・M2Pの可動支承が腐食により固定化していることが損傷の原因であると判断した。平成23年度に橋脚の耐荷力照査を行った結果、中間橋脚の可動支承が固定化(剛結)している状態でレベル2地震動が発生すると、柱のせん断力が許容値を超過することが判明した。平成25年4月13日に発生した淡路島地震(マグニチュード6.3、鳴門市で震度5弱を観測)の際に行った挙動調査でも、中間橋脚の可動支承の固定化を再確認し、固定化している可動支承を補修し機能回復(少なくとも回転機能)を図る必要性が生じた。支承補修までの経緯を表-1に示す。

表-1 支承補修までの経緯

Table 1 Maintenance history of bearings before repair

年度	支承に係る事象
H11	支承の擬合金溶射(+桁の全面塗替塗装)
H15	支承エッジ部、ボルトにさびの発生を確認
H21	支承エッジ部、ボルトのさびが腐食へ進展
H22	耐震補強工事後、5A(固定支承)に新設した変位制限構造が損傷→可動支承(中間橋脚の28基)の固定化を確認
	その後検証を行った結果、可動支承の固定化により、レベル2地震動時、柱のせん断力に対する耐荷力の不足が判明
H25	淡路島地震後の調査で、可動支承の固定化を再確認

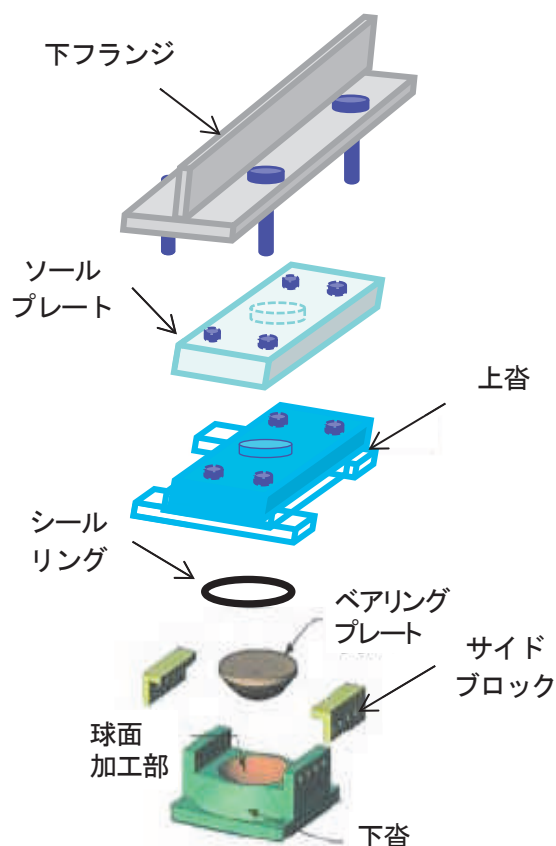


図-2 BP-A 支承

Fig.2 BP-A bearing (Spherical bearing)

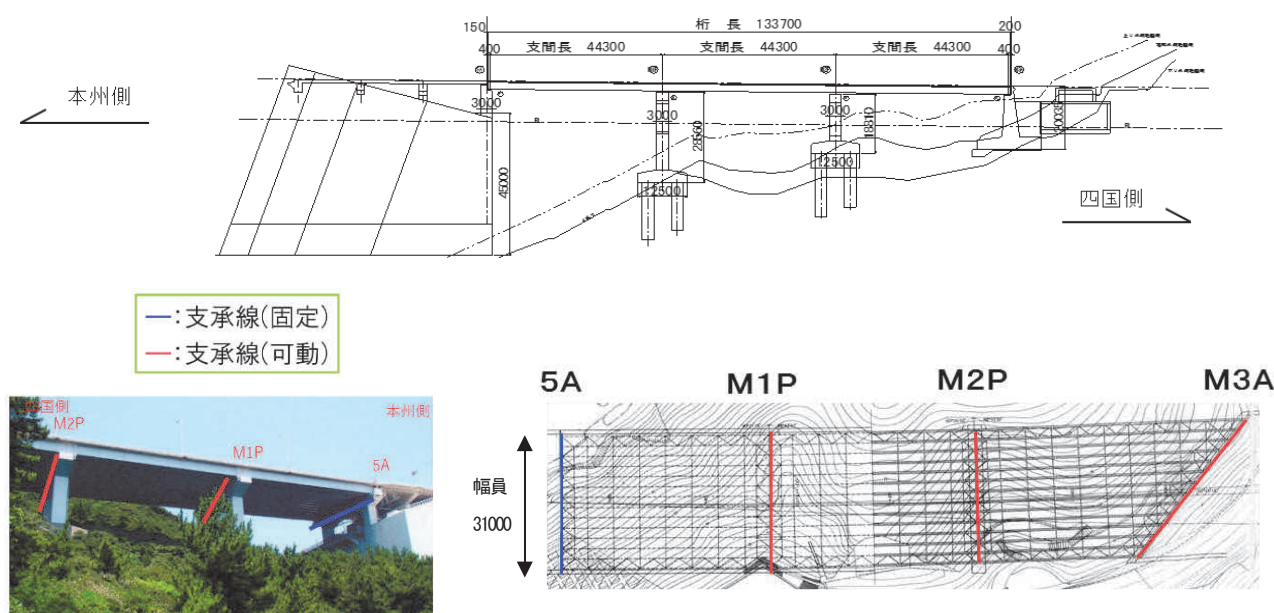


図-1 孫崎高架橋一般図

Fig.1 General view of Magosaki Viaduct

2. 外観調査

可動支承が固定化している原因を特定するため、補修工事を実施する前に中間橋脚の支承1基についてジャッキアップを行い、上沓及び下沓の外観調査を行った。

外観調査の結果、上沓・下沓間にさび等の堆積物が多く見られた(写真-3)。ベアリングプレートでは、上面・曲面ともに腐食が見られず、潤滑剤が残存(写真-4)し、健全な状態であったため、支承の可動機能を喪失させるような要因は確認されなかった。上沓では、ベアリングプレート当たり面周囲の腐食が著しく、最大5mmの減肉が見られた(写真-5)。ソールプレートは側面の腐食が見られたが、比較的健全であった。

以上の調査結果から、可動支承が固定化した原因は、主に上沓のベアリングプレート当たり面周囲に著しい腐食が発生し、そのさび等が上沓下沓間に堆積・固着したためであると断定した。

補修工事では、腐食の著しい上沓とソールプレートを新規製作したものに交換し、防食仕様は建設当時の塗装及び平成11年度補修時の擬合金溶射から溶融亜鉛・アルミ合金めっきとすることで防食機能の向上を図った。なお、それ以外のベアリングプレートや下沓等は比較的健全であることから、防せい工を行い再利用することとした。補修工事の作業フローを図-3に、上沓と下沓の防食仕様を図-4に示す。

3. 補修工事

3.1 既設上沓撤去

ジャッキアップに当たり、主桁ウェブ面に補強材を取り付けた。取り付け部は粗面処理を行い、表面粗さ $Ra=5.0\mu m$ 以上を確保した上でトルシア型高力ボルトによる摩擦接合を行った。

中間橋脚の支承に油圧ジャッキ(3000kN)を設置して各



写真-3 上沓下沓間のさび等の状況
Photo 3 Corrosion between top and bottom bearing



写真-4 下沓内部球面加工部の状況
Photo 4 Spherical surface inside of bottom bearing



写真-5 上沓のベアリングプレート
当たり面周囲の腐食状況
Photo 5 Corrosion of top bearing around the
contact surface with bearing plate

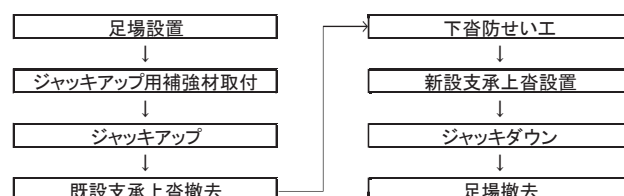


図-3 作業フロー
Fig.3 Working Flow

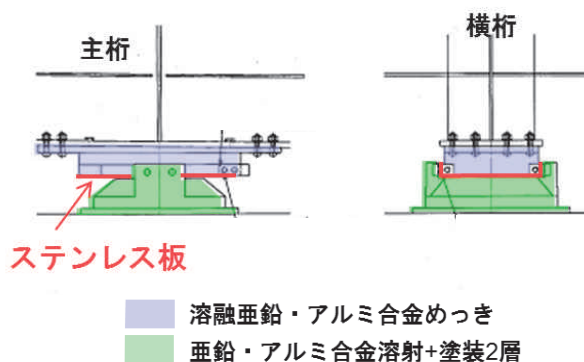
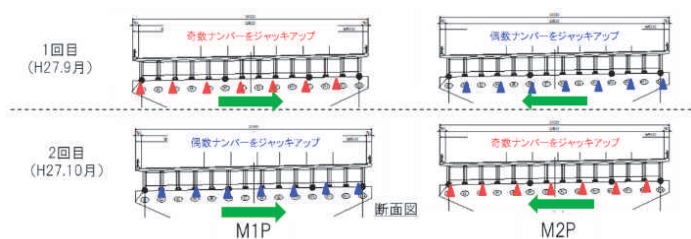


図-4 防食仕様
Fig.4 Specification of corrosion protection

橋脚7基ずつ、2回に分割してジャッキアップを行った(図—5)。この際、不均等反力等によりジャッキアップ量が不足する場合に備え、ジャッキアップする桁の両側の桁に補助ジャッキ(1000kN)を設置し、反力を一部負担させた。また、ジャッキアップ時にデジタル荷重計及びデジタル変位計を利用してリアルタイムで反力と変位量を計測し、ジャッキアップ量については交通に影響なく施工可能である3mm以下として管理した。

上沓・ソールプレート撤去の際、引き抜き時に下沓と干渉する上沓ストッパー及び下フランジ下面とソールプレートとの溶接ビードを切断した。上沓・ソールプレート撤去の施工概要を図—6に示す。



図—5 ジャッキアップ工程

Fig.5 Process of jacking up

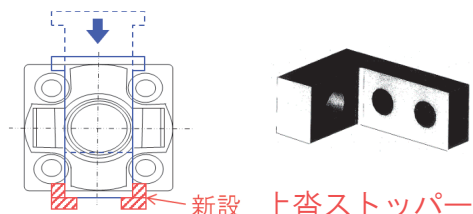
3.2 下沓防せい工・新規製作上沓設置

下沓の防せい工は、亜鉛・アルミニウム合金による金属溶射を行い、封孔処理剤を塗布した。封孔処理完了後は、長期防せい性能を向上させる目的で、ポリウレタ

ン樹脂塗料の2層塗布を行った。

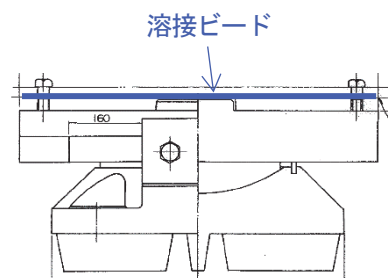
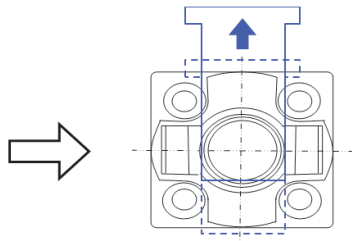
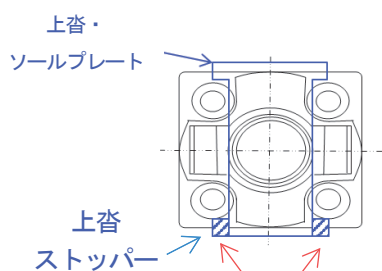
下沓防せい工完了後、新規製作上沓・ソールプレートを挿入し、高力ボルトで上沓のストッパーを取り付けた(写真—6)。

支承の補修を終えた後、ジャッキダウンをジャッキアップの逆順で行い、工事を完了した(写真—7)。



写真—6 上沓ストッパー取り付け

Photo 6 Installment of the stopper



上沓ストッパー切断状況



ソールプレート溶接ビード切断状況



上沓・ソールプレート引き抜き後の状況

図—6 上沓撤去の施工概要

Fig.6 Removal of top bearing



写真-7 支承補修後
Photo 7 Bearing after repair

4. 挙動調査

支承の機能が回復したかどうかを確認する目的で、支承補修の前後で支承の挙動調査を行った。

4.1 補修工事中の測定

平成27年5月26日～29日に支承補修前のデータ測定、平成27年12月8日～11日に支承補修後のデータ測定を行った。それぞれの測定個所を図-7に示す。

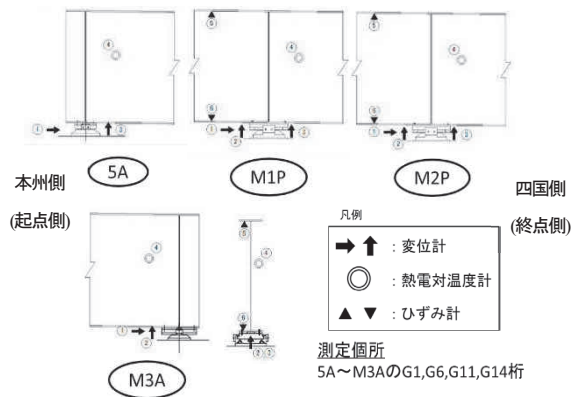


図-7 データ測定個所
Fig.7 Measurement position

(I) 支間長の変化

変位計及びトータルステーションを用いて測定した支承補修前の支間長の変化を図-8に示す。

測定結果を見ると、支承の移動機能が失われているため、温度変化に追従して各支間長が変化している。5Aは固定支承であるが、回転機能の確保のため上査と下査の間の余裕が最大10mm設けられており、この余裕分の移動による挙動を確認した。

中間橋脚M1P・M2Pの可動支承は固定化しており、

M3Aの移動機能は保たれていることを考慮すると、5Aの固定支承を基準として桁全体が伸び縮みしており、固定化している中間橋脚においては橋脚ごと変形して桁の伸縮に追従していることが予想された(図-9)。

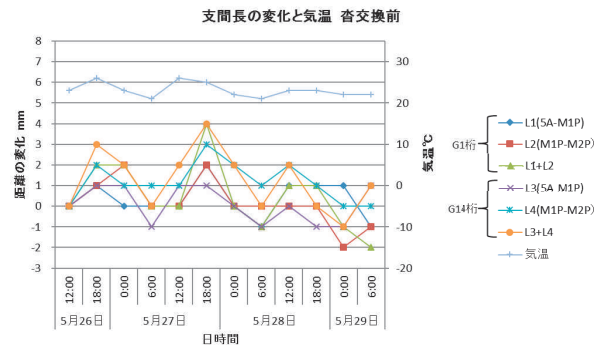


図-8 支間長の変化と温度(補修前)
Fig.8 Variation of span length

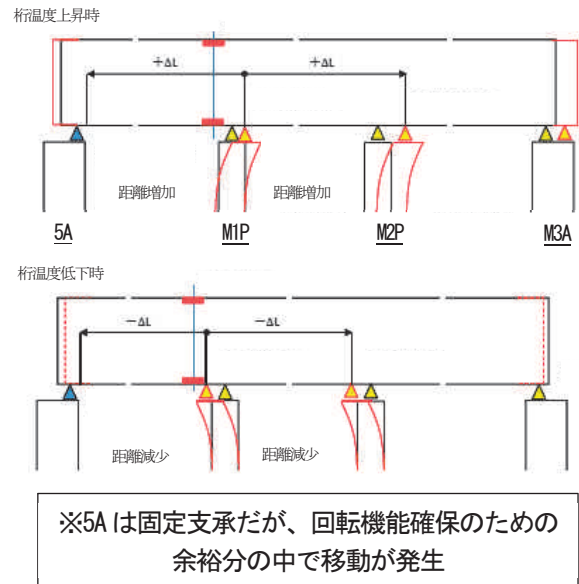


図-9 橋脚の変形
Fig.9 Deformation of the pier

(2) 車両载荷による鉛直変位測定

荷重車を走行させた際の支承をはさんだ起点側と終点側のそれぞれ2点の変位を測定することで、支承の回転機能を評価した。

連続桁の場合の荷重車走行による主桁の変位挙動を図-10に示す。

荷重車の走行に伴う中間橋脚の支承をはさんだ鉛直変位の一例として、M1PG1支承の補修前のデータを図-11に、補修後のデータを図-12に示す。

補修前には鉛直変位はほとんど確認できなかったが、補修後には荷重車の走行に伴い、変位が上下しており、連続桁としての挙動が確認でき、支承の回転機能が回復していることを確認した。

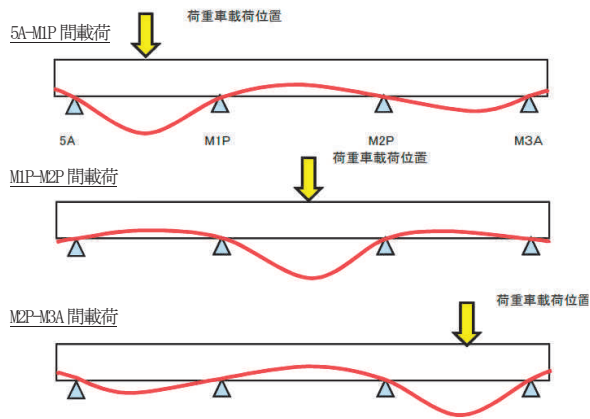


図-10 連続桁の挙動

Fig.10 Behavior of the continuous girder

(3)橋軸変位・ひずみの測定

支承の橋軸方向への移動を確認するため、支承補修の前後で支承の移動量と一日の温度変化量を測定した。その結果を図-13に示す。

支承補修の前と同様、補修直後の測定でも支承の移動は確認できなかった。

さらに、鋼桁に発生している応力を把握するため、中間橋脚の支承の起点側近傍の上フランジと下フランジのひずみを72時間連続測定した。一例として、M1PG1桁のひずみについて、補修前のデータを図-14に、補修後のデータを図-15に示す。

ひずみについても、支承補修後の改善は見られなかった。ひずみの増減は桁上端部では少ない一方で、桁下端部では大きくなっているが、これは支承の移動が拘束されているためと考えられる。補修後のM1PG1桁の桁下端部には、最大約70 μ のひずみが発生しており、これを応力換算すると約14N/mm²の応力が発生していることになる。

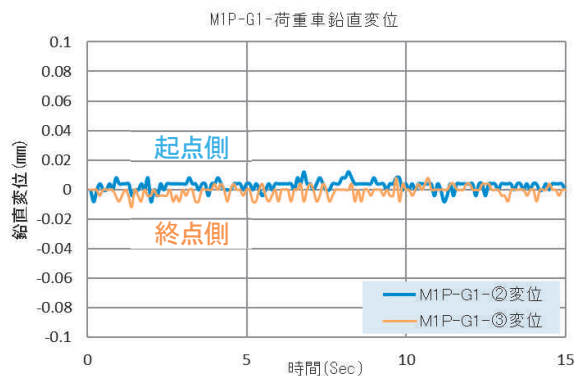


図-11 補修前のM1PG1 支承をはさんだ鉛直変位

Fig.11 Vertical displacement of the girder either side of the M1PG1 bearing (before repair)

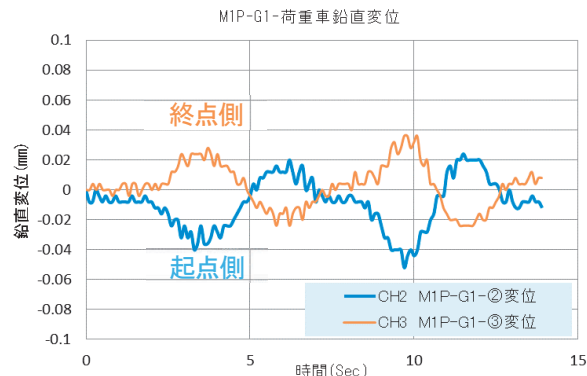


図-12 補修後のM1PG1 支承をはさんだ鉛直変位

Fig.12 Vertical displacement of the girder either side of the M1PG1 bearing (after repair)

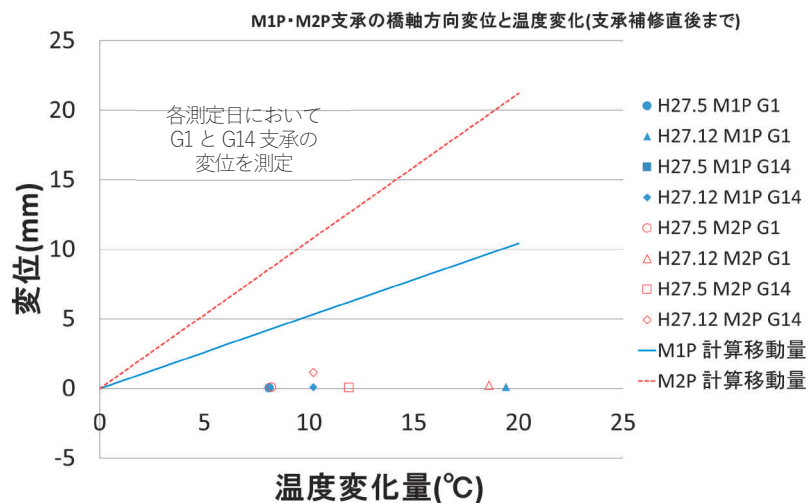


図-13 支承変位と温度変化の関係(補修直後まで)

Fig.13 Bearing displacement-temperature relationship(until completion of repair)

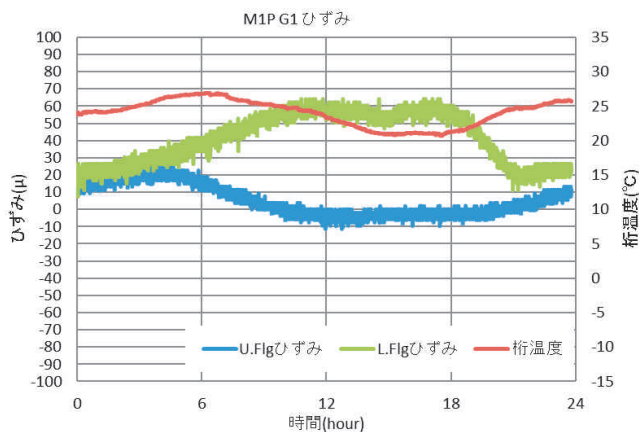


図-14 補修前ひずみ測定(M1PG1 桁)
Fig.14 Strain measurement before repair (M1PG1 girder)

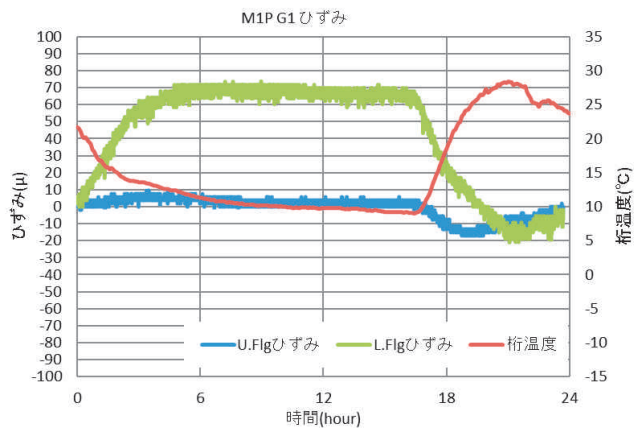


図-15 補修後ひずみ測定(M1PG1 桁)
Fig.15 Strain measurement after repair (M1PG1 girder)

4.2 補修工事後の移動量の測定

支承補修工事の完了後、平成28年2月9日に支承にマークを印し、この時点の支承の状態を基準として、移動量の測定を開始した。これまでの測定に基づく支承変位と温度変化の関係について、M1P・M2PのG1支承のデータを代表として図-16に示す。

平成28年4月12日に行った中間橋脚の測定で、支承補修後に初めてM2PG1支承の移動を確認し、移動量は最大5mmであった。その後も、M2PG1支承については、計算移動量とほぼ一致する挙動を示しており、支承補修による移動機能の回復を確認している。

一方、M1PG1支承の移動量は、M2PG1支承の移動量よりも非常に小さく、初めて支承の移動を確認した平成

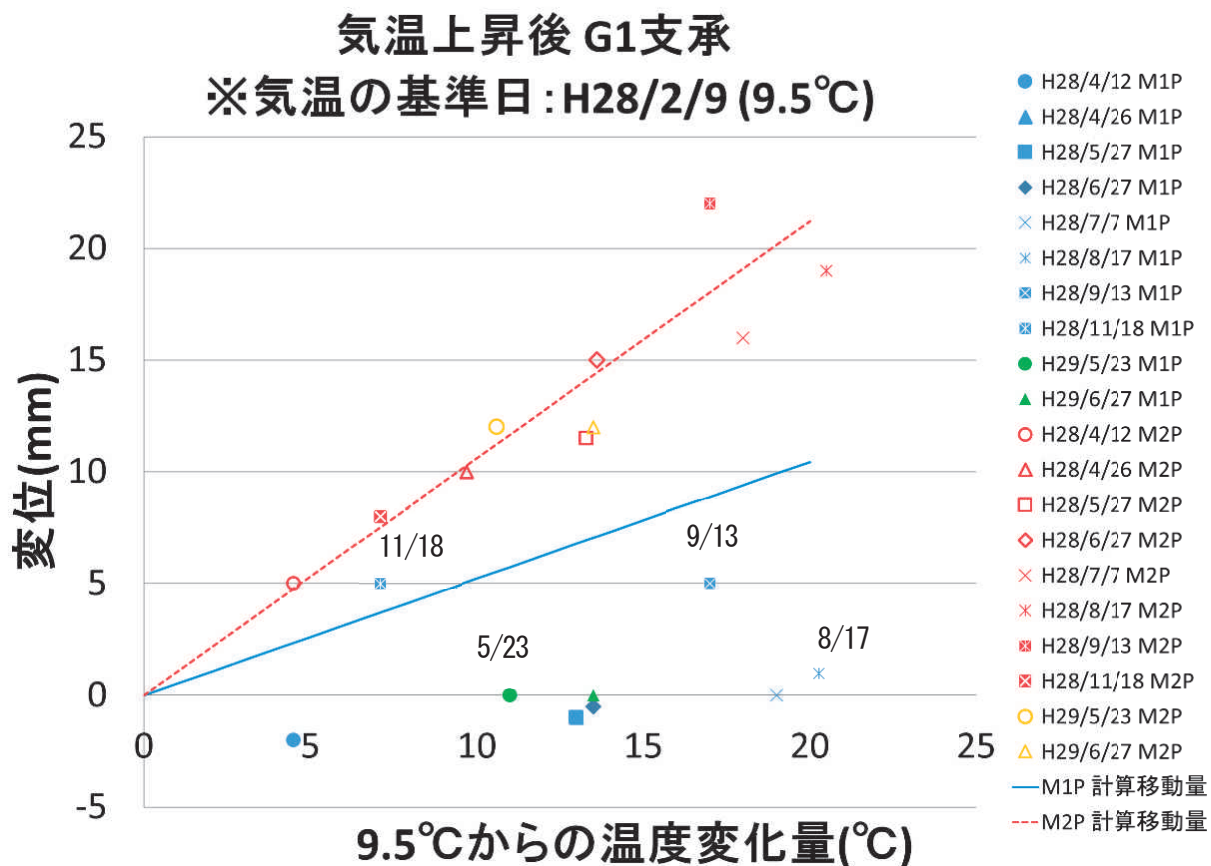


図-16 支承変位と温度変化の関係(気温上昇後)
Fig.16 Bearing displacement-temperature relationship(after temperature increase)

28年8月17日(図-17)と、その後更に移動した平成28年9月13日においても、計算移動量を下回った。さらに、気温が低下した平成28年11月18日には、桁が収縮する方向に支承が移動していなかったが、平成29年5月23日の測定では、前年同時期の支承の状態に戻っていたことから、平成28年11月18日よりも後で、より低い気温となった際に支承が移動し、その後また動きが少なくなったと考えられる。

これまでの支承の挙動から、5A～M1Pの桁の伸縮については、普段はM1P橋脚が橋軸方向に変形することによって追従しているが、大きな温度変化等によって支承の摩擦(拘束)が切れた時のみ、支承が移動していると考えられる。

4.3 まとめ

- 当初、中間橋脚の固定化の原因は支承の腐食のためと考えて、腐食の著しかった上沓交換を伴う補修を行った。しかし、補修直後には明確な支承の移動はなかった。
- 気温が上昇し、それまで拘束されていた支承が動き始めたことをM2P支承で確認した。動き出す以前には何らかの要因で支承の移動を拘束していたようであるが、動き始めた以降は正常な可動支承

の挙動を示し、その移動量は計算移動量とほぼ一致している。

- その一方で、M1P支承については大きな温度変化等がない限り移動しにくい傾向が見られる。M1P支承の動きが微少である原因は特定できていないが、多主桁であること、支間長に比べて幅員が広いこと、曲線橋であることにより、支承が移動しにくい構造であることに加え、M1Pの橋脚高さがM2Pよりも高いため、橋軸方向への橋脚の変形が起りやすくなっていることが予想される(図-18)。

5. おわりに

支承補修工事により、設計移動量よりは少ないものの中間橋脚の支承の機能が回復し、桁が移動している。今後も移動量の測定を定期的に行い、年間を通した支承や橋脚の挙動を把握していく。

現在、厳しい腐食環境から主桁を保護するため、主桁をカバープレートで防護する工事を行っているが、主桁をカバープレートで防護することは、支承の防食にも寄与するものと考えている(図-19)。

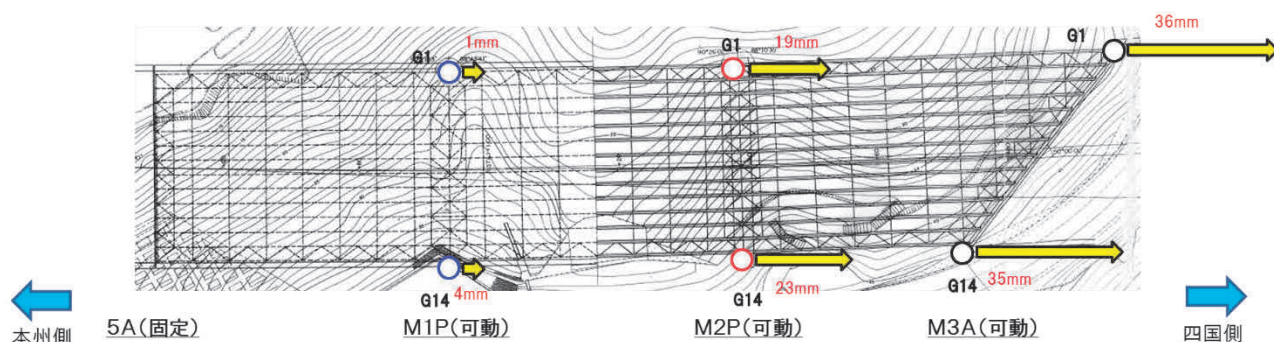


図-17 支承変位の測定結果(H28/8/17の例)

Fig.17 Measurement Results on August 17, 2016

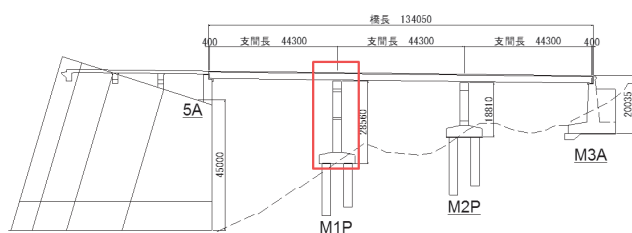


図-18 孫崎高架橋側面図

Fig.18 Side view of Magosaki Viaduct



図-19 防食防護工完成イメージ図

Fig.19 Conceptual drawing of the corrosion proof cover

下津井瀬戸大橋PC桁部と櫃石島高架橋の耐震補強

Seismic Retrofit for PC-girders at Both Ends of Shimotsu-Seto Bridge and Hitsuishijima Viaduct

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

長大橋技術センター
総括・耐震グループリーダー

橋本 龍 Ryu Hashimoto

坂出管理センター
橋梁維持第一課長代理

遠藤 和男 Kazuo Endo

坂出管理センター
橋梁維持第一課長

概要

瀬戸大橋の耐震補強は、平成25年度から耐震検討を開始し、約8年間をかけて完了する予定である。瀬戸大橋を構成する橋梁群を桁橋、トラス橋、斜張橋、吊橋に分類し、工事発注工程等を考慮して、耐震検討を順次実施してきた。ここでは、平成28年度末に工事が完了した下津井瀬戸大橋の側径間部に位置するPC桁部と櫃石島高架橋1Pから12Pまでの耐震性照査、補強設計、耐震補強工事について報告する。

耐震検討においては、道路橋示方書・同解説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。いずれのPC橋においても、橋脚のせん断耐力や支承の耐力が不足することが確認されたため、耐震対策として繊維巻立て補強や支承補強を実施した。

Seismic retrofit of the Seto-Ohashi Bridges and approach viaducts was started in 2013. It will be completed in 2020. Seismic retrofit has been conducted considering retrofit work schedule and dividing the Seto-Ohashi Bridges into four groups such as girder bridges, truss bridges, cable-stayed bridges, and suspension bridges. This paper describes seismic retrofit design and site work for the PC-girders at both ends of the Shimotsu-Seto Bridge and the Hitsuishijima Viaduct between 1P and 12P piers. Retrofitting work for such parts was completed in spring, 2017.

Seismic verification and retrofit design were carried out to consider “Seismic Performance Level-2” specified in “the Design Specifications for Highway Bridges.” It was found that shear capacity of bridge piers and strength for bearings in each viaduct were not sufficient against large-scale seismic motions. Fiber lining around the piers and reinforcement of such bearings were done as seismic countermeasures.

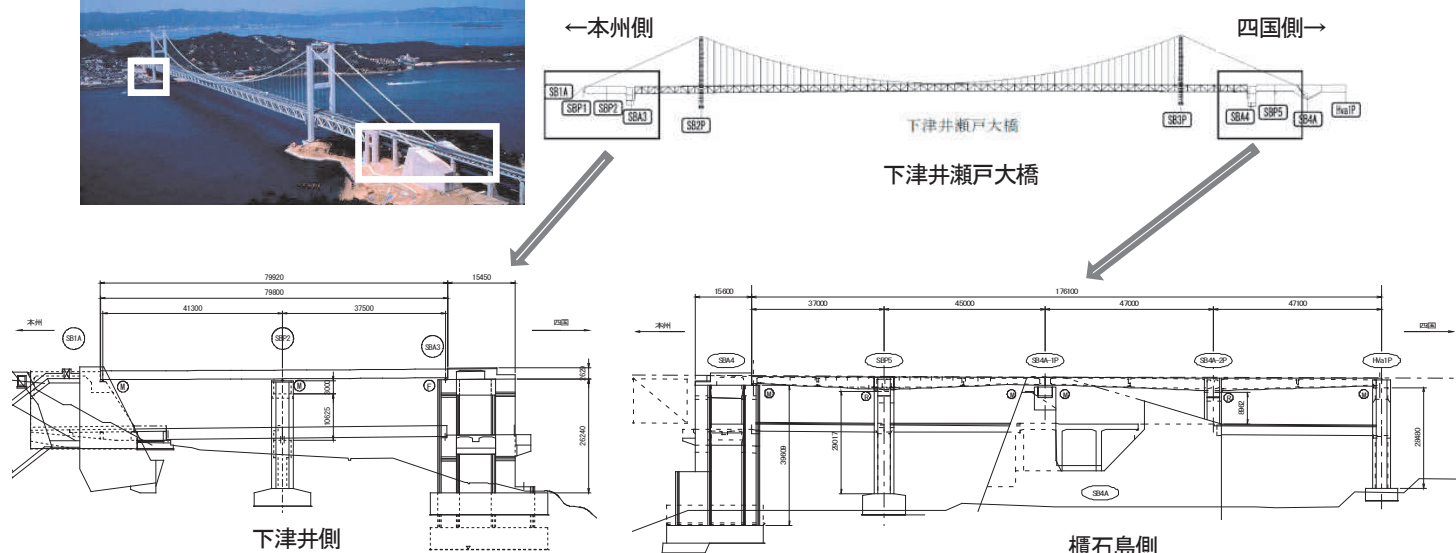
1. はじめに

本州四国連絡橋の海峡部橋梁はその規模が大きく、道路橋示方書・同解説¹⁾（以下「道示」という。）の適用範囲を超える橋梁が多い。また、吊橋、斜張橋などの吊り形式の橋梁も含まれていることから、耐震検討にあつては、専門的な検討、解析が必要となることが多い。そのため、瀬戸大橋を含む海峡部橋梁全てについて、長大橋技術センターが主体となり、保全部及び管理センターと一体となって耐震性照査、補強設計を実施してきた。

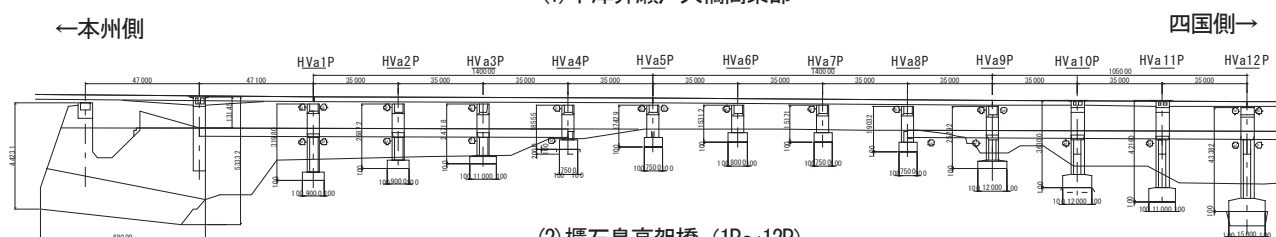
瀬戸大橋の耐震補強は平成25年度から本格的に着手されており、瀬戸大橋を構成する橋梁のうち、桁橋（下津井瀬戸大橋PC桁部、櫃石島高架橋、岩黒島高架橋、与島高架橋及び番の州高架橋）については、平成25年度から、順次、耐震性照査が開始された。そのうち、下津井

瀬戸大橋PC桁部及び櫃石島高架橋（1P～12P）の耐震補強工事はそれぞれ別工事として進捗し、平成26年6月から開始され、平成29年2月に完了した。

耐震性照査の結果、いずれの高架橋においても、鉄筋コンクリート橋脚や梁の一部にせん断耐力が不足する部分があること、支承の耐力が不足することが確認されたため、炭素繊維巻立てもしくはアラミド繊維巻立てにより補強するとともに、支承補強が実施された。本文では、下津井瀬戸大橋PC桁部及び櫃石島高架橋の下津井瀬戸大橋に隣接する区間（1P～12P）の耐震性照査、補強設計及び補強工事の概要について報告する。なお、残りの桁橋（PC高架橋）は、今回の成果を参考として、耐震性照査、補強設計が実施され、平成29年度には、全高架橋の耐震検討を終えた。



(1) 下津井瀬戸大橋高架部



(2) 櫃石島高架橋 (1P~12P)

図-1 橋梁一般図

Fig.1 General view of bridges

表-1 橋梁概要

Table 1 Outline of bridges

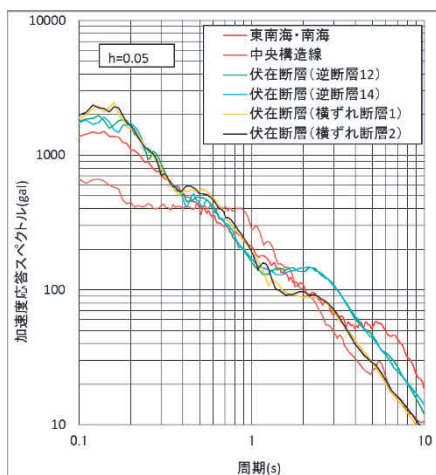
橋梁名	橋長(m)	支間割(m)	上部工形式(道路桁)	構造的特徴他
下津井瀬戸大橋下津井側(1A側)高架部	79.8	41.5+37.5	2径間連続PC箱桁橋	・下津井瀬戸大橋の側径間部に位置
下津井瀬戸大橋櫃石島側(4A側)高架部	176.1	36.6+44.6+46.6+46.7	2径間連続PCラーメン橋×2	・橋軸、橋軸直角両方向の立体ラーメン構造部あり
櫃石島高架橋	HVa1P~HV a5P	140.0	(34.3+35+35+34.3)	4径間連続PC箱桁橋
	HVa5P~HV a9P	140.0	(34.3+35+35+34.3)	4径間連続PC箱桁橋
	HVa9P~HV a12P	105.0	34.3+35+34	3径間連続PCラーメン箱桁橋

2. 橋梁概要

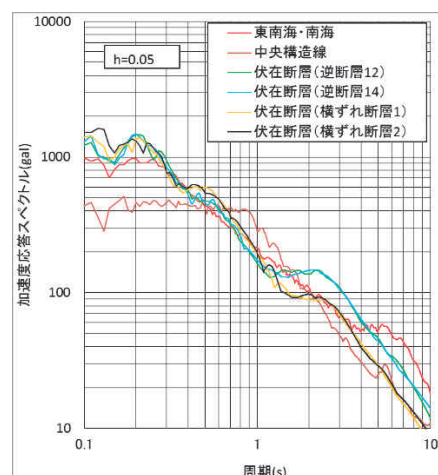
橋梁一般図を図-1に、橋梁概要を表-1に示す。下津井瀬戸大橋の下津井側側径間内に位置する下津井側PC桁部は道路鉄道併用のPC高架橋となっている。下津井瀬戸大橋1A (SB1A) からトラス桁張出し径間端部までの区間は道路鉄道併用の2径間連続PC箱桁橋である。一方、櫃石島側のトラス桁張出し径間端部から下津井瀬戸大橋4A (SB4A) までの区間は道鉄併用の2径間連続PCラーメン橋である。中間支点の剛結梁は鉄道桁も受ける二層式門型ラーメン橋脚となっている。上部構造は、上下線一体となった2主桁箱桁橋となっており、桁の終点側にランプ橋が接続しているために、幅員が拡幅されていく。SB4Aから櫃石島高架橋1Pまでの区間も、2径間連続PCラーメン橋となっており、中間支点の剛結梁はSB4A上に立つラーメン橋脚と一体となっている。上部

構造の断面は島内に取り付くランプ橋のために変断面となり、上下線が一体となった2主桁箱桁橋である。

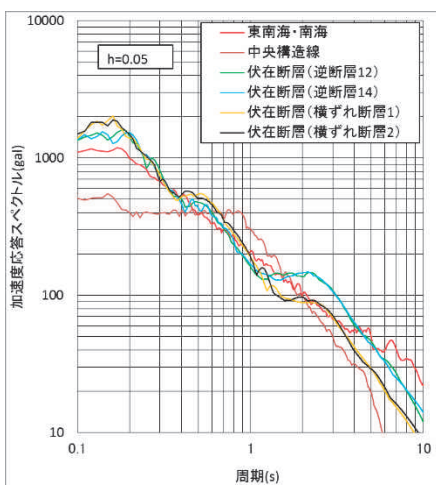
櫃石島高架橋は下津井瀬戸大橋と櫃石島橋の間に位置する櫃石島島内に建設された高架橋である。島内をほぼ南北に縦断する総延長約1460mの道路鉄道併用橋であり、道路桁は橋脚水平梁と剛結された連続立体ラーメンPC橋、鉄道桁は多径間連続のPC橋となっている。本高架橋は地形的な要因により橋脚の高さが大きく異なり、約34m~68mのスパンで32基の橋脚により支持されている。本文では、先行して耐震設計・補強工事が完了した1P~12Pを対象としている。本区間は、表-1に示すとおり、3橋梁で構成されている。いずれの区間も1層式又は2層式のRCラーメン橋脚に支持されており、基礎形式はいずれも直接基礎である。



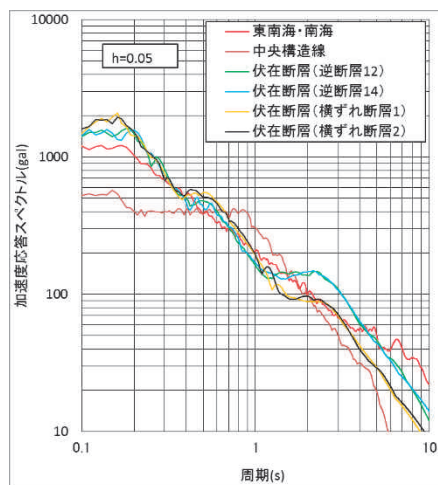
(1) 下津井瀬戸大橋高架部（下津井側） 1A



(2) 下津井瀬戸大橋高架部（櫃石島側） 4A



(3) 櫃石島高架橋 5P



(4) 櫃石島高架橋 11P

図-2 入力地震動（有効入力動）

Fig.2 Input seismic motions

掛け違い橋脚のHVa1P、5P、9P及び12P橋脚はRC橋脚であるが、中間橋脚である2P～4P及び6P～8P橋脚は梁部がPRC構造の橋脚である。一方、9P～12P区間の中間橋脚である10P及び11P橋脚は道路主桁と剛結構造になっている。

3. 耐震性照査

3.1 基本方針

本文が対象にしている各橋梁に適用された耐震基準は道示V耐震設計編（昭和55年版）²⁾であり、現在の道示耐震設計編³⁾に規定されているレベル2地震動に相当するような地震動は当初設計では考慮されていなかった。したがって、耐震性照査にあたっては、ある程度の補強が必要になると予想された。当該橋梁を含めた瀬戸大橋の耐震性照査、補強設計の基本方針については、参考文献4)から6)を参照されたい。

瀬戸大橋は道鉄併用橋であるため、耐震検討を行うにあたり、その設計法に関して道路・鉄道関係機関の合意のもと検討を進めてきた。

必要とされる耐震性能には、「大規模地震による損傷が限定的なものにとどまり、最悪の事態である落橋や倒壊が起きず、緊急輸送路及び橋としての機能回復が速やかに行いうる性能」である道示の耐震性能2を適用した。耐震性照査にあたっては、原則、道路の設計基準に従って行うものとした。これは、建設当時、部材設計は基本的に道路基準に準拠したためである。

3.2 入力地震動

耐震性照査に使用した瀬戸大橋地点での設計地震動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、断層モデルにより推定された工学的基盤 $V_s=2.5\text{km/s}$ もしくは 1.5km/s で定義されたものである。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、工学的基盤で設定された地震動を基に、いずれの高架橋においても、各橋脚基礎は直接基礎であるため、一次元波動伝播解析（SHAKE）により、基礎底面位置の地震動を算出した。耐震性能照査に用いた地

表－2 部材のモデル化と減衰定数
Table 2 Model of members and Damping constant

部材	モデル化	減衰定数
上部構造	道路桁	線形はり要素 3%
	鉄道桁	線形はり要素 3%
ゴム支承	線形ばね要素	3%
金属支承	剛部材	0%
下部構造	橋脚	非線形はり要素 5%
	梁	非線形はり要素 2%
基礎(地盤ばね)	直接基礎	非線形S-Rモデル 10%

震動を図－2に示す。一次元波動伝播解析で入力地震動を作成するため、橋軸方向と橋軸直角方向の入力地震動は同一の波形となる。地盤条件やフーチング底面の位置関係で若干の違いは生じるが、入力地震動としての大小関係の傾向はいずれもほぼ同様である。0.1～0.2秒程度の短周期では応答レベルのピークが2000gal程度発生するが、それ以上の長周期域においては全体的に小さくなっている。

耐震検討の対象である櫃石島高架橋は、道示¹⁾適用範囲の支間長であるため、道示に従い、橋軸方向及び橋軸直角方向にそれぞれ独立して設計地震動を入力した。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。一方、下津井瀬戸大橋PC桁部は、吊橋部からの影響を考慮するために、PC桁部だけではなく、吊橋部を含む橋梁全体系として解析を行うことにした。そこで、他の長大橋と同様に、水平2方向と鉛直方向を含む3方向同時入力とした。伏在断層を想定した地震波は櫃石島高架橋と同様に入力した。

3.3 列車荷重

道鉄併用橋である瀬戸大橋の耐震補強設計では、列車荷重を考慮することとしている。その荷重値等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（地震時従荷重のため70%）

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は下り線側とした。列車荷重については、厳密にモデル化するには、鉄道桁位置の加速度が0.2Gまたは0.3Gに達した時に、それ以上の慣性力が作用しないようにモデル化することになるが、簡易的に、橋軸方向には列車荷重35kN/m×0.2、橋軸直角方向には35kN/m×0.3を鉄道桁に付加質量として考慮した。なお、自動車荷重は道示に準じて考慮しなかった。

3.4 動的解析

(1)解析モデル

耐震検討は橋梁全体系に対する非線形動的解析法により実施した。解析では、入力地震動は各基礎位置の地震動を用いて多点異入力とし、基礎底面位置に時刻歴波形

を入力した。櫃石島高架橋の動的解析に用いる減衰はRayleigh型粘性減衰とし、各部材の減衰定数は、道示に準じて、表－2のとおり設定した。一方、下津井瀬戸大橋PC桁部の解析にあたっては、部材別の剛性比例型減衰を用いることにした。側径間部のPC桁部と吊橋部が一体となった解析モデルにおいては、振動単位別の減衰が設定できる部材別剛性比例減衰のほうがより正確にモード別の減衰を評価できると考えたためである。

耐震性照査、補強設計に用いる解析モデルとして、鉄筋コンクリート橋脚の非線形解析時には、橋軸方向の柱部材のように軸力変動が小さい部材は、死荷重時の軸力で求めたM-φモデルでモデル化し、橋軸直角方向の柱部材のように軸力変動が大きい部材は、軸力変動が考慮できるN-M相関M-φモデルでモデル化した。櫃石島側PC桁部の橋脚の形状は台形であり、橋軸直角方向からの地震動に対して非対称なことから、曲げの作用方向によってN-M相関が異なるが、モデル化の制約上、N-M相関モデルは対称にモデル化した。本検討では、応答せん断力が大きくなる耐力が大きいN-M相関と、応答曲率が大きくなる耐力が小さいN-M相関の2モデルを用いて解析及び照査を行った。事前に実施した線形解析結果より、曲げ損傷範囲は狭いことが予想されたため、非線形性を考慮するのは端部部材のみとした。隣接桁の重量は支承が可動支承の場合は橋軸方向には分担重量を無視し、橋軸直角方向には死荷重反力を考慮した。固定支承の橋軸方向の分担重量は多点固定の場合は死荷重反力を、1点固定の場合は隣接桁の全重量を考慮した。橋軸直角方向は可動支承と同様に分担重量を死荷重反力とした。ゴム支承の場合は、橋軸方向及び橋軸直角方向のいずれも分担重量を死荷重反力とした。

解析モデルははり要素を基本とし、支承と基礎―地盤間の動きはばね要素でモデル化した。基礎―地盤間の動きを表すばね要素はフーチング底面に鉛直方向ばね、水平方向ばね及び回転ばねを設置し、回転ばねには、鉄道構造物等設計基準⁷⁾に準じて浮き上がりによる非線形性を考慮できるようにした。

図－3に櫃石島高架橋の解析モデルを示す。

(2)材料構成則

コンクリートの材料構成則は、道示V耐震設計編³⁾におけるコンクリートの応力－ひずみ曲線とした。ただし、帯鉄筋端部の効果を無視し、応力－ひずみ曲線の最大応力度はコンクリートの設計基準強度とした。

(3)解析手法

解析は材料の非線形性と幾何学的な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）により行った。橋軸直角方向の解析においては、対象区間の橋梁構造の非対称性から地震動を反転（作用方向を逆）させた解析も実施した。なお、精度の高いせん断耐力の算出が困難な構造についてはFEM解析を実施し、実構造に近い耐力で評価した。

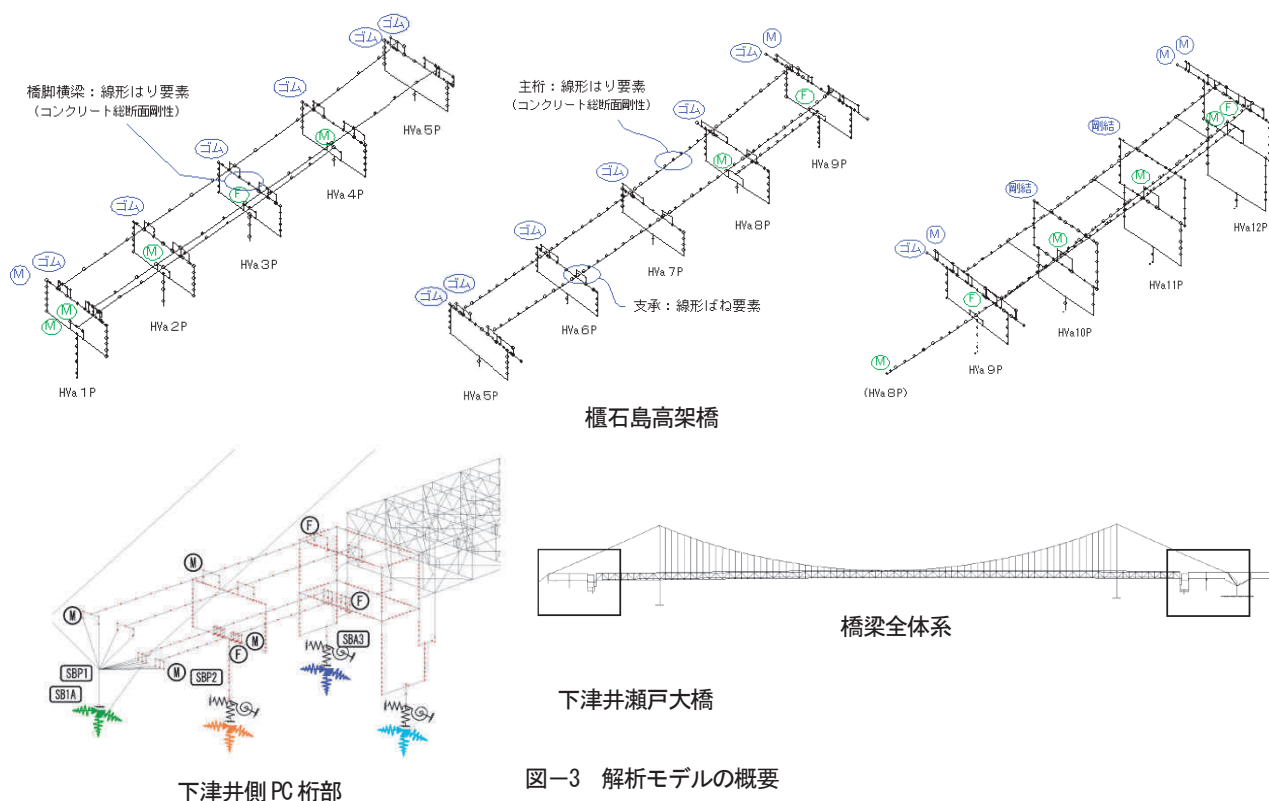


図-3 解析モデルの概要
Fig.3 Analytical model

表-3 固有周期

Table 3 Natural period of bridges

下津井瀬戸大橋 PC 桁部

橋梁		振動単位	固有周期 (sec)
下津井側部	橋軸方向	SBG1、SBA3	0.34
		SBP2	0.45
	橋直方向	SBG1、SBA3、SBP2	0.25
樫石島側部	橋軸方向	SBG2、SBP5	0.75
		SBA4	0.37
	橋直方向	SBG2、SBA4、SBP5	0.40

樫石島高架橋

橋梁		固有周期 (sec)
HV1P~3P	橋軸方向	1.11
	橋直方向	0.23
HV5P~9P	橋軸方向	1.09
	橋直方向	0.24
HV9P~12P	橋軸方向	0.70
	橋直方向	0.43

(4)固有値解析結果

表-3に対象橋梁の固有値解析結果を示す。下津井瀬戸大橋PC桁部及び樫石島高架橋とも、橋軸直角方向の固有周期が橋軸方向のものより小さく、耐震性照査において、厳しくなることが予想された。樫石島高架橋1P~9Pでは、橋軸方向と橋軸直角方向の固有周期の差が大きい一方、下津井瀬戸大橋PC桁部や剛結構造を有する樫石島高架橋9P~12Pではそれらの差があまり生じていないことがわかる。

4. 耐震性照査結果

4.1 照査項目と許容値

(1)コンクリート部材の照査

RC橋脚は道示V耐震設計編³⁾に従い、曲げとせん断の照査を行った。主桁や橋脚横梁は上部構造を支持する重要な部材であることから、塑性化又はエネルギー吸収を考慮する部材は橋脚の柱部のみとした。ただし、ラーメン橋脚もしくはラーメン橋梁であることから、耐震性照

査の結果、道路桁の一部と橋脚横梁部の一部に降伏曲げ耐力を超過する箇所が確認された。このような箇所については、応答値と許容値の関係から損傷程度を推定し、副次的な塑性化に留まっていることを確認した上で、損傷（降伏曲げモーメントの超過）を許容することとした。

(2)支承部の照査

動的解析によって得られた支承移動量及び支承反力について、許容値（移動可能量及び支承耐力（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 耐震性照査結果

耐震性照査は非線形解析による発生応答値が各部材の許容値以下となることを基本とした。

樫石島高架橋において、構造部位ごとの照査結果の一覧（最大応答値と許容値の比）と柱及び横梁のせん断照査に着目した照査結果をそれぞれ表-4及び図-4に示す。一部の橋脚（基礎から鉄道桁横梁まで）において、FEM解析を行い、せん断耐力を再評価した結果、補強なしとした橋脚があるが、その他の橋脚を含め、基本、所要の

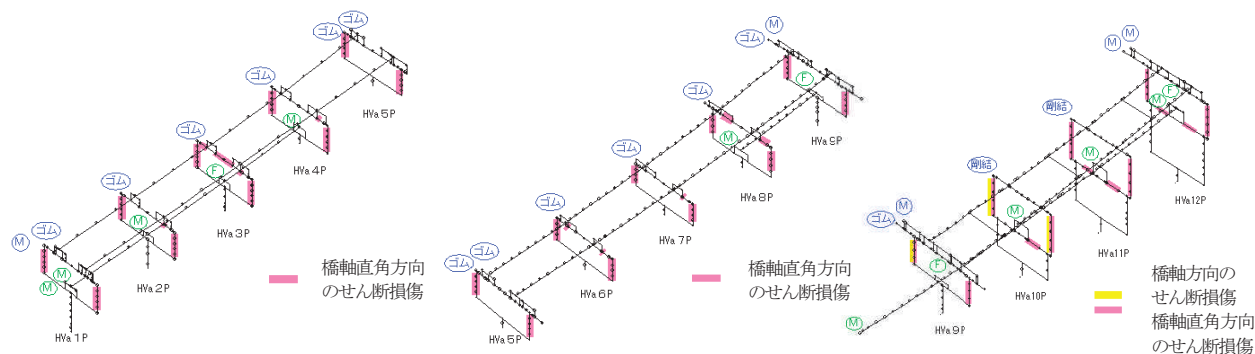


図-4 耐震性能照査結果（櫃石島高架橋）

Fig.4 Results of seismic performance verification

表-4 耐震性照査結果総括表（櫃石島高架橋）

Table 5 Summary of seismic performance verification

区間名				HVa1P～HVa5P					HVa5P～HVa9P					HVa9P～HVa12P			
上部工形式				4径間連続PC箱桁					4径間連続PC箱桁					3径間連続PCラーメン箱桁			
支保条件				ゴム(E)	ゴム(E)	ゴム(E)	ゴム(E)	ゴム(E)	ゴム(E)	ゴム(E)	ゴム(E)	ゴム(E)	BP(M)	剛結	剛結	BP(M)	
部材				HVa1P	HVa2P	HVa3P	HVa4P	HVa5P	HVa6P	HVa7P	HVa8P	HVa9P	HVa10P	HVa11P	HVa12P		
照査項目	橋脚 (基礎～鉄道桁)	橋軸方向	曲率	0.15	0.23	0.28						0.61	0.62	0.71	0.57	0.35	
			せん断耐力	0.89	0.69	0.51*						0.87*	0.75*	0.87	0.87	0.84	
		橋軸直角方向	曲げ耐力	0.88	0.30	0.27							0.28	0.30	0.47	0.60	0.98
			せん断耐力	0.44	0.47	0.39							0.37	0.37	0.46	0.78	0.85
	柱部 (鉄道桁～道路桁)	橋軸方向	曲率	0.15	0.18	0.25	0.21	0.32	0.33	0.24	0.23	0.19	0.48	0.81	0.47	0.23	0.35
			せん断耐力	0.58	0.66	0.79	0.63	0.90	0.96	0.55	0.55	0.57	0.97	1.14	1.24	0.87	0.74
		橋軸直角方向	曲率	0.44	0.39	0.63	0.41	0.82	0.80	0.32	0.29	0.93	0.93	0.92	0.30	0.43	0.30
			せん断耐力	2.30	2.04	2.37	2.18	1.34	2.39	1.51	1.14	1.56	2.34	2.38	1.75	1.92	1.36
	橋梁部 (1P～9P:道路受梁) (10P～12P:鉄道受梁)	橋軸直角方向	曲げ耐力	0.94	0.83	1.06**	0.98	0.81	1.25	0.82	0.74	0.83	1.23**	0.16	0.03	0.04	0.18
			せん断耐力	0.89	1.01	1.38	1.23	0.78	0.89	1.34	0.91	1.52	0.80	0.90	1.08	1.22	1.23
	支保	橋軸直角方向	耐力	2.90	2.56	3.32	2.68	4.01	2.45	3.19	3.13	2.09	4.43	11.5	道路桁橋梁剛結部		7.65

* : FEM解析により推定したせん断耐力により照査

** : 横梁を非線形部材でモデル化し再照査し、許容できる塑性化と判断

耐力を有すると判断できた。柱部（鉄道桁横梁から道路桁横梁まで）においては、橋軸直角方向のせん断耐力が全ての柱部材で不足する結果となり、せん断補強が必要と判断した。横梁部においては、掛け違い部の橋脚の横梁を除き、せん断照査を満足しない結果となったため、せん断補強が必要と判断した。一方、曲げ耐力に関しては、横梁を非線形部材としたモデル化により許容曲率に対する照査を行った結果、余裕度は比較的大きく、副次的な塑性化に留まっていると判断できた。支保部においては、橋軸直角方向の照査において、全ての箇所において応答値が支保の耐力を超える値となったため、支保補強として変位制限構造等が必要と判断した。なお、9P及び12Pでは、橋軸方向変位が許容値を超過しサイドブロックもしくは下沓突起部が損傷すると考えられたが、応答変位量から突起部損傷後も鉛直支持機能は保持されたと考え、許容できる損傷に留まると判断した。また、橋脚1P、5P、9P及び12Pにおいて、既設の桁かかり長は必要長を満足していること、落橋防止構造においては不要とされる規定に該当することが確認できたとともに、各橋脚における支保高さは約25cm～30cmであることから、段差防止構造も不要と判断した。本解析において、

最大応答値を生じさせた地震波はおおむね伏在断層地震波（逆断層タイプ）であった。

下津井瀬戸大橋PC桁部の照査結果を表-5及び図-5に示す。両PC桁橋とも、コンクリート柱や梁にせん断破壊が発生することが確認された。一方、曲げ耐力に関しては、所要の安全性が確保されていることが判明した。また、下津井側PC桁部のみ、支保の耐力が不足し、補強が必要となることが判明したので、変位制限構造等が必要となる。なお、落橋防止システムに関しては、いずれも所要の規定を満たし、不要と判断した。なお、下津井瀬戸大橋PC桁部の耐震性照査において最大応答値を生じさせた地震波はおおむね伏在断層地震波（横ずれタイプ）であった。

5. 耐震補強設計

5.1 耐震補強方針

櫃石島高架橋の柱部及び梁部の補強工法について、以下を基本方針と設定した。

せん断補強は、鉄道が近接する狭隘な現場（写真-1）であることから、施工性を最優先し、基本的に人力作業

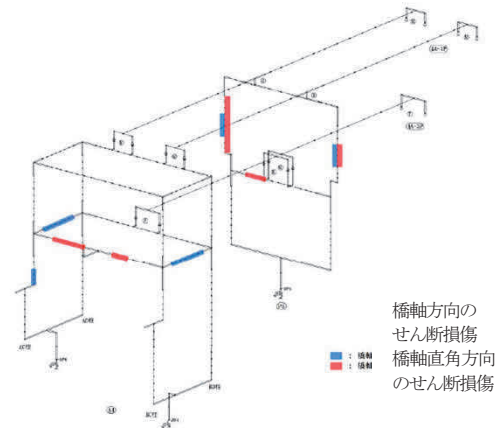
表－5 耐震性照査結果総括表（下津井瀬戸大橋 PC 桁部）

Table 5 Summary of seismic performance verification

橋梁名		下津井瀬戸大橋高架部			
構造形式（道路）		田之浦側		櫃石島側	
支保条件		PC2径間連続箱桁		PC2径間連続立体ラーメン	
部位	照査項目	M	F	M	R
照査結果	柱（上層）	曲げ	○	○	○
		せん断	×	○	×
	柱（下層）又は壁	曲げ	○	○	○
		せん断	○	×	×
	梁（上層）	曲げ	○	○	○
		せん断	×	×	○
	梁（下層）	曲げ	○	○	○
		せん断	○	×	×
	支保	耐力	橋軸	×	○
		直角	×	×	○

○：耐震性を満足

×：耐震性を満足しない



図－5 耐震性能照査結果（下津井瀬戸大橋下津井側）

Fig.4 Results of seismic performance verification

で施工可能な繊維巻立て工法を採用することにした。繊維巻立て補強は、安価と判断された炭素繊維巻立て補強を原則的に採用するものとし、鉄道架線に近接する道路受け梁部の補強にあたっては、非導電性のアラミド繊維を巻立て補強に採用することにした（図－6参照）。

一方、耐震検討が1年ほど遅れて実施された下津井瀬戸大橋PC桁部では、アラミド繊維の施工性が炭素繊維のそれより優れていることなどを考慮し、せん断耐力補強が必要な箇所にはアラミド繊維巻立てを採用することにした。

5.2 耐震補強設計

耐震性照査の結果を踏まえ、柱・梁部の耐震補強工法の比較検討を行った。前述のとおり、繊維巻立てを採用することにしたが、補強により、柱部の耐力や重量が大きくなると、補強が不要と判断された基礎部への負荷が大きくなるため、柱部の耐力や重量の増分は極力小さくなるような巻立て方法を選定したものである。なお、梁部は上面で桁を支持しているため、側面と底面にしか巻立てられず、側面と底面に確実に定着できるように配慮した。柱断面形状が特殊な台形・六角形断面の橋脚があるため、形状に合わせて確実に定着できるように検討した。

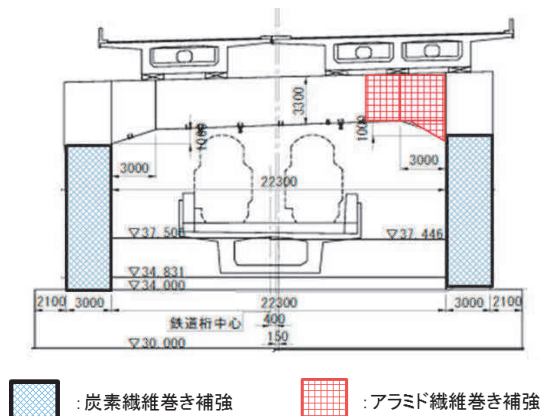
耐震性照査の結果、下津井瀬戸大橋PC桁部の一部の道路桁支保と櫃石島高架橋のHValP～HVal2P橋脚上の全ての道路桁支保（道路桁との剛結部は除く）は橋軸直角方向の地震動によって損傷するため、施工性及び経済性を考慮し、RC製の支保補完構造を設置することにした。支保補完構造は、道路桁の上り線と下り線の間とそれらの外側に計3箇所設置し、掛け違い橋脚では、起点・終点側の両側に設置することにした。この支保補完構造はRC製であり、かつ、一辺が1mを超える（橋軸直角方向には5m以上）構造であるため、補完構造設置に伴う重量増により、橋梁全体系の耐震性への影響が無視できない可能性があると考えられたが、それらの程度は小さく、支保補完構造の設置が高架橋の耐震性に及ぼす

影響は小さいことを確認した。支保補完構造の一例を図－7に示す。



写真－1 鉄道供用中の櫃石島高架橋

Photo 1 Hitsuishijima Viaduct under railway operation



図－6 柱部、梁部の補強イメージ

Fig. 6 Example of retrofitting of column and beam

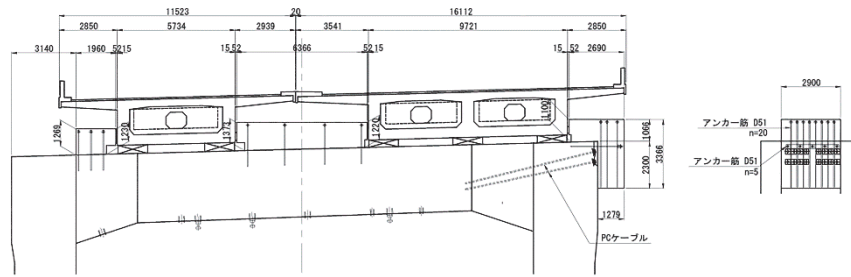


図-7 櫃石島高架橋 4P 橋脚支承補完構造
Fig. 7 Retrofitting of 4P pier in Hitsuishijima Viaduct

6. 耐震補強工事

耐震性照査・補強設計の結果を基に、下津井瀬戸大橋 PC 桁部SB1A橋台～SBA3橋台、SBA4橋台～SB4A-2P橋脚、櫃石島高架橋HVa1P橋脚～HVa12P橋脚の橋脚補強工・支承補完構造設置工等の耐震補強工事を行った。

6.1 JR営業線近接作業

下津井瀬戸大橋 PC 桁部及び櫃石島高架橋は、道路桁下部に JR 営業線があることから、本州四国連絡高速道路（株）（以下「本四高速」という。）と四国旅客鉄道（株）（以下「JR 四国」という。）が、耐震補強工事の施工内容について事前協議を行い、鉄道受梁上面より上部を JR 営業線近接工事範囲とし、本四高速施工範囲及び JR 委託工事施工範囲は図-8のとおりとなった。

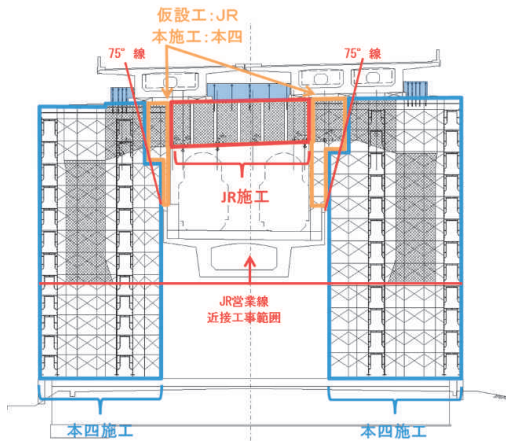


図-8 JR営業線近接作業範囲
Fig. 8 Working range around JR operation area

JR 営業線近接工事範囲内の本四高速施工範囲で、土工、仮設足場の設置・撤去、橋脚補強工や支承補完構造設置工等の作業を行う場合は、作業予定日の前週に JR 四国と作業内容について打ち合わせを行い、その指示に従って、工事管理者及び列車見張員を配置した（写真-2）。

作業中は、列車見張員が列車接近時に作業員等に警笛や拡声器による合図を行い、その合図により作業を一時中断する等の列車に対する運転保安の確保を行った。



写真-2 列車見張員配置
Photo 2 Watch for railway operation

また、下記 1) ～3) の作業を行う場合は、JR 四国に工事の委託を行った。

- 1) 鉄道壁高欄直上より内側での仮設足場設置撤去、繊維シート巻立て、支承補完構造設置等の作業
- 2) 鉄道壁高欄直上より外側で、き電線からの離隔が 2 m 未満の範囲での仮設足場設置撤去、繊維シート巻立て、支承補完構造設置等の作業
- 3) き電線防護作業・き電停止作業・線路閉鎖作業

なお、上記 2) については、JR 四国による足場設置後、同足場内で安全に作業可能と判断された場合は、繊維シート巻立て、支承補完構造設置作業は本四高速が行った（写真-3、写真-4）。



写真-3 JR 委託工事設置足場
Photo 3 Scaffolding done by JR work



写真-4 JR 委託繊維巻立て作業
Photo 4 Fiber lining done by JR work

鉄道壁高欄天端外側から上方へ 75° で立ち上げた線 (75° 線) より内側の管理用通路や仮設足場の隙間及び周囲については、メッシュシート・防災シート・合板等で覆い、線路内への資機材等の落下や飛散が無いよう、入念に養生を行い施工した (写真-5)。



写真-5 管理用通路養生
Photo 5 Protection around maintenance way

6.2 土工

繊維シート巻立ての施工に際し、橋脚基部の掘削・埋戻しを行った。掘削はオープン掘削を基本としたが、一般道、土工区間、ランプ道路の近接によりオープン掘削が不可能な場合は、ライナープレート等による土留めを行い、小型バックホウ及び人力により掘削を行った (写真-6)。



写真-6 HVa6P (東側) 掘削状況
Photo 6 Excavation around HVa6P (eastern side)

また、掘削箇所に電気、通信、水道等の埋設物がある

場合は、事前に埋設物管理者と埋設位置や埋設数等の確認を行い、支障となる場合は一時撤去・移設を依頼し、撤去・移設完了を確認した後に掘削を行った。橋脚補強工完了後は、仮置きしてあった掘削土で埋戻しを行った。

6.3 橋脚補強工

耐震照査・補強設計の結果に基づき、橋脚柱部及び道路・鉄道受梁部に、せん断耐力の向上を目的として炭素・アラミド繊維シートの巻立てを行った。

櫃石島高架橋施工時の繊維シートは、前述のとおり、炭素繊維シートの採用が経済的であったことから、炭素繊維シート巻立てを基本とし、き電線に近接している道路受梁部のみ JR 四国との協議により、絶縁性を有するアラミド繊維シート巻立てとした。

下津井瀬戸大橋 PC 桁部施工時の繊維シートは、炭素繊維シートとアラミド繊維シートの比較を再度行い、経済性に大きな差が無いこと、全箇所をアラミド繊維シートとすることで安全性の向上 (絶縁性材料の使用による感電防止)、施工性の向上 (シートの剛性が炭素繊維に比べて低いことから施工性が優れる、単一材料使用による材料管理の容易化)、スケールメリットの向上 (材料調達費用の低減) が期待できることから、全箇所アラミド繊維シートによる巻立てとした。

施工は各橋台・橋脚に設置した仮設足場を使用して行い、下地処理を入念に実施し、プライマー塗布、不陸調整、含浸エポキシ樹脂塗布 (下塗)、繊維シート貼付け、含浸エポキシ樹脂塗布 (上塗)、表面仕上げ (ポリマーセメントモルタル $t=1\text{mm}$)、固定金具設置、表面保護 (中塗り: エポキシ樹脂塗料中塗、上塗り: ふっ素樹脂塗料上塗) を行った (図-2)。

なお、橋脚補強工の施工は「構造物施工管理要領」⁸⁾ 及び「アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領 (案)」⁹⁾ に従って、外気温 5℃以下又は湿度 85%以上の場合や、降雨・結露等で施工中に水分の侵入が予想される場合は作業を中止し、品質の確保を行った。

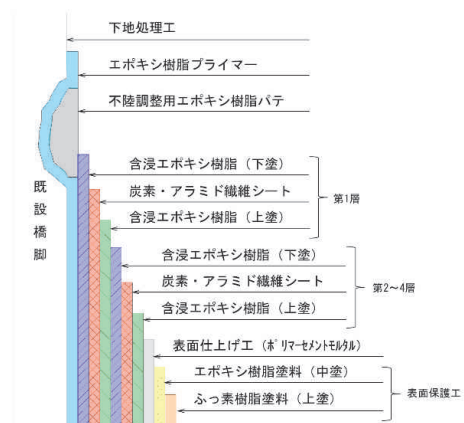


図-2 繊維シート巻立て断面図
Fig. 2 Detail of fiber lining section

(1)下地処理工

既設コンクリート面と繊維シートの良好な付着と一体化を図るため、既設コンクリート表面の脆弱部や汚れ、レタンス層、凹凸等をディスクグラインダーで取り除いて平たんに仕上げ、橋脚等の隅角部は、局部的な屈折による繊維シートの破断を防ぐために面取り（炭素繊維シート：R=50mm、アラミド繊維シート：R=10mm）を行った。

また、繊維巻立て範囲及び仮設足場の設置により近接可能なシート巻立て範囲外の既設コンクリート面の事前調査を行い、補修が必要な 0.4mm 以上のひび割れや浮き・剥落等について、ひび割れ補修材や断面修復材の充てんによる補修を行った。

(2)プライマー塗布・不陸調整

下地処理完了後、プライマー塗布及び不陸調整を行った。プライマー塗布は既設コンクリートの表面強化、不陸調整材の接着性向上を目的に行い、不陸調整は、繊維シート貼付けの際の浮きや接着不良の原因となる、下地処理で平たんにできない凹凸や段差等をエポキシ樹脂系パテ材で平たんに仕上げた。

(3)繊維シート巻立て

不陸調整後、割付図を作成して継手位置や継手長、貼付け方向の確認を行うとともに、既設コンクリート面に繊維シートの直線性確保のための貼付け位置の墨出しを行った後、含浸エポキシ樹脂（下塗）の塗布、繊維シート貼付け、含浸エポキシ樹脂（上塗）塗布を行った。

含浸エポキシ樹脂（下塗）の塗布は、乾燥した不陸調整材に、含浸エポキシ樹脂をローラー・刷毛を用いて均一に塗布した。

含浸エポキシ樹脂（下塗）の塗布後は、速やかに繊維シートの貼付けを行った。貼付けは、墨出しに従って繊維方向に気泡を除去しながら行い、脱泡ローラーやゴムヘラを使用して浮きを押さえるとともに含浸を促進させた。目付量が多い繊維シートを使用する際には、含浸に通常より時間を要することから養生時間を長めにとり、また、冬季には気温の低下から樹脂の粘度が上がり含浸し難くなることから、アイロンを使用し熱を加えて貼付けを行うことにより（写真－7）、含浸の促進を行った。

触指によって含浸エポキシ樹脂が繊維シートの表面に浸み上がったことを確認した後、再度貼り付けた繊維シートの上から下塗り時と同じように、含浸エポキシ樹脂（上塗）を塗布した。

含浸エポキシ樹脂（上塗）の硬化後、目視及び点検棒等により浮きや膨れ等の不良箇所の有無について検査を行い、不良箇所があれば補修を行った。

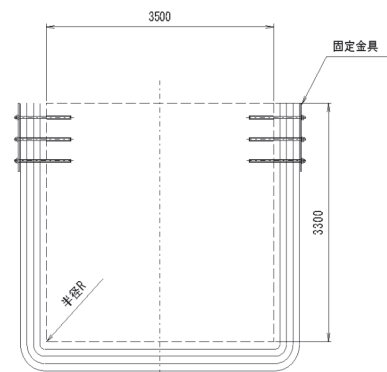


写真－7 アイロンを使用した繊維シート貼付け
Photo 7 Fiber lining with iron

2 層以上の繊維シートを貼り付ける場合は、1 層目の含浸エポキシ樹脂（上塗）の塗布完了から 4 時間以上経過後、触指によって硬化状態を確認してから行った。

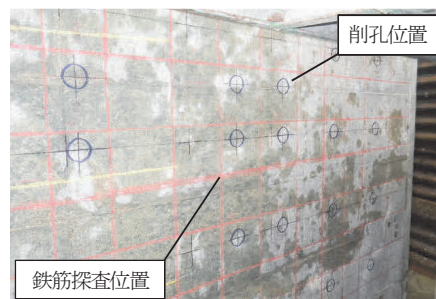
(4)固定金具製作・設置

繊維シート巻立て部のうち、道路・鉄道受梁部は天端部の支承等との干渉を避けるため、柱部は地中梁部を避けるために 3 面シート巻立てとし、図－3 に示すとおり、繊維シート巻立て端部をあと施工アンカーと固定金具により定着する構造とした。



図－3 3面シート巻立て部定着詳細図
Fig. 3 Fixing part of three-side fiber lining

あと施工アンカーの削孔にあたっては、事前に電磁波レーダーによる鉄筋探査を行い、その結果を基に削孔位置を計画し、現地ヘマーキングを行った（写真－8）。



写真－8 鉄筋探査結果マーキング
Photo 8 Results of reinforcing rebar probe

削孔は、コアボーリングマシンをマーキングに従い、水平器を使用して据付け角度を確認しながら設置し、構造物内の既設鉄筋を誤って切断することのないように、鉄筋センサーやメタルセンサー付きコードリールを使用して行った（写真－9）。



写真－9 コアボーリングマシンによるアンカー削孔
Photo 9 Anchor hole drilling with boring machine

削孔後は、孔内に残留しているコンクリート塊やほこりの除去、孔内の乾燥を行い、所定の削孔長が確保されていることを確認し、エポキシ樹脂注入材を孔内に空気だまりや未充てん箇所が生じないように充てんした。

充てん後は、工場で切断・ねじ切り等の加工を行い、ねじ部のみ 5%Al－1%Mg 系の溶融亜鉛アルミ合金めっき（亜鉛・アルミニウム・マグネシウムめっき）（以下「溶融亜鉛アルミ合金めっき」という。）による防食を行ったアンカーボルトを、所定の深度まで挿入し、あと施工アンカーの定着を行った。

定着後は、超音波探傷試験器を使用してアンカーボルト長の計測、油圧ジャッキによる引抜試験を行い、所定の定着長・引抜耐力を有していることを確認した。

なお、既設鉄筋等との接触により、所定の深度まで削孔できなかった孔（不達孔）については、アンカーボルト定着に使用するエポキシ樹脂注入材を使用して、穴埋め補修を行った。

固定金具は、あと施工アンカー定着完了後にアンカー位置をできる限り正確に計測し、現地での設置作業を考慮して1枚あたりの重量が最大で60kg以下となるよう割り付けし、工場で製作を行った。

製作した固定金具及び取り付けナットは、溶融亜鉛アルミ合金めっきによる防食を行い、現地に搬入した。

設置は、金具背面にパテ状エポキシ樹脂を 5kg/m²を目安として塗布し、構造物と固定金具との間に隙間が生じないように密着させ、アンカーボルトに座金・ナットを取り付けて締め付けを行い固定した。

設置後、構造物と固定金具の間に水分の侵入防止を目的として、固定金具周囲に2成分型変性シリコーンによるシーリングを行った（写真－10）。



写真－10 受梁部固定金具
Photo 10 Fixing plate at RC beam

(5)表面仕上げ・表面保護

繊維シート巻立て完了後に、紫外線や外力からの保護を目的にポリマーセメントモルタルを所定の厚さ（ $t=1\text{mm}$ ）塗布した。また、海峡部区間であることから、海塩粒子の影響を考慮して、ポリマーセメントモルタルの上にエポキシ樹脂塗料（中塗）＋ふっ素樹脂塗料（上塗）の保護塗装を行い、橋脚補強工を完了した（写真－11）。



写真－11 HVa12P 柱部・梁部補強完了
Photo 11 After retrofitting at pier and beam, HVa12P

6.4 支承補完構造設置工

耐震照査・補強設計の結果に基づき、現況の支承がレベル2地震動に抵抗できるよう、支承機能を補完するコンクリート構造・鋼構造の突起を橋脚天端に設置した（写真－12）。



写真-12 支承補完構造（コンクリート構造・鋼構造）

Photo 12 Bearing reinforcement

(1)コンクリート構造

コンクリート構造の突起は、橋脚天端にあと施工アンカーの削孔・定着後、鉄筋・型枠を組み立ててコンクリート打設を行い設置した。

コンクリート打設は、本線上や高架下等にコンクリートポンプ車を据え付けて行った。特に中央部の支承補完構造施工時は、ポンプ車の配管延長が長くなることから、事前に生コン工場で試験施工を行い、当初配合のスランプ値では配管内でコンクリートが閉塞する可能性がある事を確認した。

このため、施工時には高性能 AE 減水材や流動化剤を使用して、スランプを 8cm から 15cm に変更し、問題なく打設することができた。

また、配管は JR 営業線直上の管理用通路に設置するため、万が一配管・型枠等からコンクリートが漏れた場合も、線路への飛散・流出がないよう配管及び管理用通路の防炎シート等による養生を行った。

(2)鋼構造

鋼構造の突起は、工場製作した鋼製ブラケットを現地に搬入し、事前に設置したアンカーに固定して設置を行った。

鋼製ブラケットは、現地に設置したあと施工アンカーの位置を計測し、その結果を基に工場製作を行った。

工場での製作時は、材料検査や溶接検査、部材検査等を行い、特に溶接は全ての溶接箇所です浸透探傷試験を行うと共に、完全溶け込み開先溶接箇所は、製作会社以外の第三者検査会社による超音波探傷検査を実施し、溶接品質の確保を行った。

工場で作成した鋼製ブラケットは、溶融亜鉛アルミ合金めっきによる防食を行った後、現地へ搬入し、所定の位置にナットで固定し、設置した。

7. おわりに

瀬戸大橋高架橋のうち下津井瀬戸大橋側径間（下津井側と櫃石島側）内に位置するPC桁部と櫃石島高架橋1P～12P等の耐震性照査、補強設計及び耐震補強工事についてまとめて報告した。これら高架橋の耐震補強工事にあたっては、高架下にJR営業線があることや多くの埋設物・添架物があること、他工事と工事箇所の重複による工程調整など制約の多い中での工事となったが、受注者の迅速な対応や、本社長大橋技術センター・保全部、JR四国等関係者の協力により、下津井瀬戸大橋PC桁部は約1年10ヶ月間、櫃石島高架橋1P～12Pは約2年9ヶ月間の耐震補強工事期間を無事故・無災害で完了することができた。

残す高架橋についても、最後となった与島高架橋の耐震検討が平成29年6月末に終了し、順次、工事発注を進めており、瀬戸大橋全体の耐震補強はおおむね順調に進捗している。瀬戸大橋の耐震補強工事は平成32年度末頃まで引き続いて実施されることから、本工事の経験を生かし、経済的・効率的に工事を行い、お客様の安心・安全・快適な通行とともに、さらなる耐震性の向上を着実に図っていきたい。また、しまなみ海道の長大橋の耐震検討にも着手しており、円滑に進捗させていく予定である。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編、20123
- 2) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、19805
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、20123
- 4) 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、VoL35、No.115、pp37-38、20109
- 5) 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、VoL36、No.117、pp36-37、20119
- 6) 福永勲、河藤千尋：瀬戸大橋トラス橋の耐震対策、本四技報、VoL40、No.125、pp48-49、20159
- 7) 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、2007.1
- 8) (株)高速道路総合技術研究所：構造物施工管理要領、20147
- 9) アラミド補強研究会：アラミド繊維シートによる鉄筋コンクリート橋脚の補強工法設計・施工要領（案）、1998.1

防食分科会塗装（鋼）WGの取組

Report of Working Group for Metal Coating System, Anticorrosion Subcommittee

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

貴志 友基 Yuki Kishi

保全部 橋梁保全部課長

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

1. 検討目的及び経緯

保全技術交流会議の防食分科会塗装（鋼）WGでは、環境負荷を低減する塗替塗装材料としてVOC削減が期待できる省工程型塗料の開発及び塗膜消耗以外の劣化要因の調査を中心に検討を実施中である。

本稿は、塗装（鋼）WGにおいて平成28年度に実施した検討概要を報告するものである。

2. 省工程型塗料の開発（中間報告）

2.1 全体計画

経済化及び環境負荷の低減が期待される省工程型塗料の開発を実施中である。省工程型塗料は、従来の中・上塗りを1工程で塗布する仕様（膜厚55 μ m）であり、宮古島での暴露試験と実橋での試験施工により性能を確認中である。これまで3年後調査（外観、光沢保持率、付着性）では大きな問題が無いことを確認しており、今後5年後調査となる平成29年度の結果を受けて、付着力等の性能に問題が無いことが確認できれば、暫定塗料規格として制定する予定である。

2.2 旧塗膜との付着性

省工程型塗料は、これまでの中塗りを省略することによる課題として旧塗膜との付着性の確保を確認する必要がある。岩黒島橋3年後調査の結果、塗膜の外観は健全であり付着力は良好な状態である。新たにふっ素塗膜への付着性を確認するため、明石海峡大橋への試験施工を実施した。

3. 塗膜消耗以外の劣化要因調査

3.1 塗膜剥離への対応

上塗り塗料の耐久性が向上し、上塗り塗膜の消耗が遅くなれば、塗膜剥離が塗膜の寿命を決める可能性が増すため、剥離の要因調査や剥離に対する塗膜寿命の評価方法を検討している。

3.2 上塗り残存膜厚と中塗り剥離強度の関係

実橋の上塗り残存膜厚が比較的薄い塗膜の剥離強度をSAICAS試験法により計測した。上塗り塗膜と中塗り塗膜の境界部における剥離強度は、上塗り残存膜厚の減少に伴い低下する傾向にあることが明らかとなった。

3.3 終局状態確認用定点の追跡

上塗り膜厚がある程度薄くなった時点で剥がれ落ちていく可能性があるため、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-1のように中塗り露出部直近の上塗り塗膜は平均11 μ mであり、標準乾燥膜厚（30 μ m）より薄かった。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。

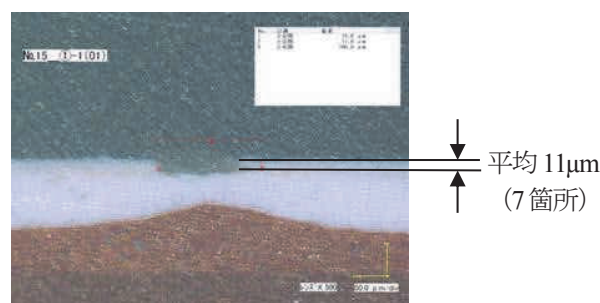


写真-1 断面観察結果

Photo 1 Cross-sectional observation results

3.4 無機ジンクリッチペイントの剥離

無機ジンクの劣化原因と劣化予測法の検討を目的に、亜鉛の酸化要因を解明するため、有機塗膜の気体透過性を調査した。上塗り塗膜は中塗り下塗り塗膜の5倍以上の気体を透過させることが明らかとなった。

4. まとめ

塗装（鋼）WGにおいて平成28年度に引き続き、省工程型塗料の開発、塗膜消耗以外の劣化要因調査等を実施し、橋梁の塗装検討を行う予定である。

防食分科会 海中基礎防食WGの取組

Report of Working Group for anticorrosion for underwater foundations, Anticorrosion Subcommittee

竹口 昌弘 Masahiro Takeguchi 岡本 豊 Yutaka Okamoto

長大橋技術センター
防食・耐風グループリーダー
(前) 保全部 橋梁保全課長

保全部
橋梁保全課長代理

1. 検討目的及び経緯

海中基礎防食WGでは、鋼製海中基礎の環境条件（海中中部、飛沫・干満帯部）に応じた最適な防食方法を確立することを目的に活動し、特に大水深の海中基礎に対して、従来の防食工法に比べ工期・コストの縮減が期待できる薄い電着被膜と維持通電を併用した防食工法（電着・電気防食併用工法）¹⁾の確立に向けた検討を実施している。また、鋼ケーソンの劣化メカニズムの解明に向けた検討も継続的に実施している。

本稿は、海中基礎防食WGにおいて平成28年度に実施した検討概要を報告するものである。

2. 電着・電気防食併用工法の防食性能調査

2.1 調査の概要

電着・電気防食併用工法の防食効果及び薄い電着被膜の長期耐久性を確認するために、岩黒島橋4P（IB4P）と南備讃瀬戸大橋6P（BB6P）の試験施工箇所において、電位計測や電着被膜の調査を行った。

2.2 電位計測結果

岩黒島橋4Pでは、ケーソン東面の一部（幅3m×高さ9m）に薄い電着被膜を生成し、その後、流電陽極方式による電気防食によりケーソン全体を防食し、壁面全体が防食電位（-780mV vs. Ag/AgCl）以下となっている。今回の調査の結果、電着施工範囲を中心に経年的に電位がより卑な方向に移行していることを確認した。一方、南備讃瀬戸大橋6Pについては、ケーソン南面の一部（幅6m×高さ6m）で薄い電着被膜を生成しているが、ケーソン全体の電気防食は行っていない。そのため、防食電流が電着施工範囲外へ流出していることが考えられ、更に陽極の消耗が想定より早く進行しており、防食電位以下の範囲が経年的に縮小傾向にある。

2.3 電着被膜分析調査結果

南備讃瀬戸大橋6Pにおいて、電着被膜の膜厚調査及び組成分析を行った。膜厚については、測定箇所によるばらつきが大きいものの、経年的に減少する傾向であることが明らかとなった。これについては、防食電流の流出、

陽極発生電流の減少などにより、電着被膜の膜厚が減少したものと考えられる。組成比については、置換作用により電着被膜中の $Mg(OH)_2$ が減少して $CaCO_3$ が増加し、被膜の緻密性が高くなっていることを確認した（表-1）。

表-1 電着被膜の分析（BB6P）
Table.1 Analysis of electrodeposition film (BB6P)

	採取位置	被膜生成直後 (H25年9月)	38ヶ月経過後 (H28年11月)
組成比 $CaCO_3/Mg(OH)_2$	右上	1.9	2.7
	中央	1.7	4.6
	左下	1.4	2.2

3. 海中におけるコンクリートの劣化状況の確認

埋込み鋼材周りの塩分浸透状況を確認するため、暴露試験体によりEPMAマッピング分析を行った（図-1）。その結果、高流動コンクリートの鋼材下では表面から30mm程度の深さまでCl濃度が高いことを確認した。

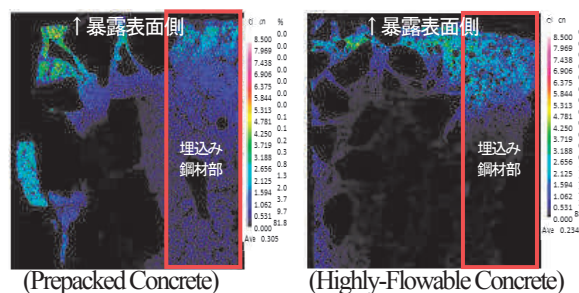


図-1 EPMAマッピング分析試験結果(Cl分布)
(左：プレパックドコンクリート、右：高流動コンクリート)
Fig.1 Analysis of elemental mapping by EPMA (Distribution of Cl)

4. まとめ

海中基礎防食WGでは、引き続き、電着・電気防食併用工法の確立及び鋼ケーソン内部のコンクリートの劣化メカニズムの解明に向けた検討を実施する予定である。

参考文献

- 1) 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

防食分科会 橋梁付属物WGの取組

Report of Working Group for bridge accessories, Anticorrosion Subcommittee

竹口 昌弘 Masahiro Takeguchi 岡本 豊 Yutaka Okamoto

長大橋技術センター
防食・耐風グループリーダー
(前) 保全部 橋梁保全課長

保全部
橋梁保全課長代理

1. 検討目的及び経緯

保全技術交流会議の防食分科会のうち、橋梁付属物WGでは、数量が膨大である橋梁付属物の補修・更新の最適化を図りコスト削減を実現するため、橋梁付属物の高耐久化及び管理路等の亜鉛めっき部材の劣化度評価手法の確立を目的に活動している。

本稿は、橋梁付属物WGにおいて平成28年度に実施した検討概要を報告するものである。

2. 鋼床版縦桁支承の延命化

鋼床版縦桁支承については、本体腐食、さび汁の流出、滑り板（PTFE板）の飛び出し、シーリングゴムのはみ出しなど、これまで多くの変状が発生している。

明石海峡大橋では、これまでも延命化対策として補修塗装を行ってきているが、新たにシーリングゴムにPTFE樹脂繊維（ふっ素樹脂）を巻き付けることで摩擦を低減し、シーリングゴムの耐久性を向上させる試験施工を実施した。この方法は、工場試験により十分な耐久性を確認しているが、今後現地の追跡調査も実施していく予定である。さらに、支承を交換する場合について、ポット内への水の浸入防止、中間プレート加工、塗装に替わる金属溶射の施工など、耐久性向上に期待できる構造の改良検討を行い、瀬戸大橋の耐震補強工事の支承交換で採用された（図-1）。

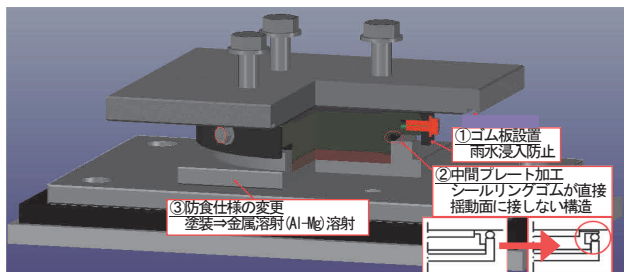


図-1 鋼床版縦桁支承の改良
Fig.1 Improvement of bearing

3. FRP材の適用範囲の拡大

大鳴門橋5A暴露試験場に設置している試験体について、暴露期間11年目の追跡調査を実施した。その結果、前回8年目調査と比べ、外観に顕著な劣化進行は見られなかった。また、母材の引張強度は、表面保護の有無による光沢度や繊維の露出度の違いに関係なく、経年による強度の低下は小さいことなどが明らかとなった。

て、暴露期間11年目の追跡調査を実施した。その結果、前回8年目調査と比べ、外観に顕著な劣化進行は見られなかった。また、母材の引張強度は、表面保護の有無による光沢度や繊維の露出度の違いに関係なく、経年による強度の低下は小さいことなどが明らかとなった。

4. 亜鉛めっき部材の劣化度評価手法の確立

因島大橋のオープングレーチングを対象に、亜鉛めっき部材の劣化度評価手法として、外観調査、電磁膜厚計による残存亜鉛めっき量測定、画像解析処理による劣化度評価などの検討を行った。その結果、電磁膜厚測定と外観調査にはある程度の相関が認められたが、電磁膜厚測定はさび層も含めた膜厚として結果が得られるため、正確な評価は困難であることを確認した。画像解析処理による劣化度の評価は、過年度に行った瀬戸大橋の管理路手摺を対象にした検討において、外観調査や顕微鏡観察による劣化度評価とおおむね整合することが確認されている。今回のグレーチング調査では、部材上面の評価は可能であるが、グレーチング内部の評価には撮影方法に工夫が必要であることが確認できた。画像解析処理は亜鉛めっき部材の劣化度の経年変化を定量的に評価するのに有効であり、従来の外観調査と組み合わせることで、よりの確な補修計画策定が可能になると考えられる。

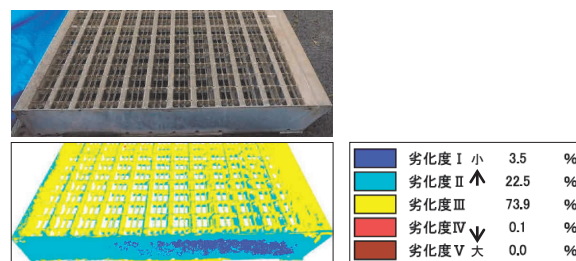


図-2 画像解析処理による劣化度評価
Fig.2 Evaluation of deterioration degree by image analysis

5. まとめ

橋梁付属物WGでは、引き続き、鋼床版縦桁支承の試験施工の評価、FRP材の適用範囲拡大に向けた検討、残存亜鉛めっきの非破壊調査手法の検討などを実施していく予定である。

疲労分科会の取組

Report of Fatigue Subcommittee

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

森山 彰 Akira Moriyama

鳴門管理センター所長
(前)長大橋技術センター
診断・構造グループリーダー

1. 検討目的及び経緯

保全技術交流会議・疲労分科会では、本州四国連絡道路において発生が確認あるいは懸念される疲労損傷に対して、できるだけ効率的かつ高精度に疲労損傷を検出するとともに、効率的に補修できるよう、新技術を取り入れた各種手法の検討を実施している。

本稿では、疲労分科会において平成28年度に実施した以下の2件の概要を報告する。

- ・瀬戸大橋トラス部材の疲労点検検討
- ・赤外線サーモグラフィによる非破壊調査

2. 瀬戸大橋トラスの疲労点検検討

2.1 経緯

瀬戸大橋の建設当時、鉄道橋への調質高張力鋼の使用実績はわずかであり、疲労に関する知見は限られたものであった。そのため、疲労設計において、橋種、継手種類、鋼種と応力比から疲労許容応力範囲を設定し、疲労設計荷重によって発生する応力範囲を照査するとともに、製作基準で許容きず（建設当時は「溶接欠陥」と呼称）の寸法を部材ごとに規定し、厳格な品質管理のもと、溶接部に残存するきずサイズが記録されている¹⁾。また維持管理段階では、建設時に検出されたきずのうちサイズが大きく、部材の等級分類が高いもののいくつかを自動超音波探傷（AUT）により追跡調査し、亀裂進展解析により100年後の亀裂寸法を把握できる体制がとられてきた。平成12年度まで実施された結果では、亀裂の進展は確認されず、亀裂が許容値まで達するには100年以上要することが確認され²⁾、その後の追跡調査は実施されていない。

現在、瀬戸大橋には新幹線荷重は載荷されず、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に現地計測を実施することとした。

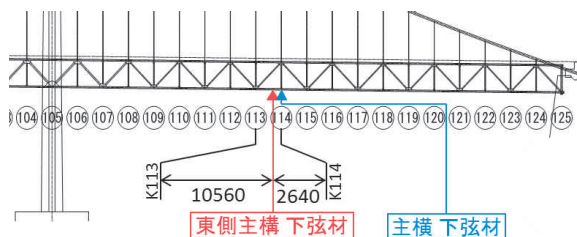


図-1 計測位置

Fig.1 Measurement locations

表-1 計測位置溶接きず寸法

Table 1 Size of flaw

きず寸法	許容きず寸法
W = 1.4 mm	Wa = 1.5 mm
H = 1.9 mm	Ha = 4.0 mm

表-2 計測結果

Table 2 Result of measurement

	設計	今回計測(1)	今回計測(2)
荷重編成	設計基準作成時の実績等により設定	貨物列車(下) + マリンライナー5両(上)	マリンライナー5両(下)
荷重	(単線載荷 ³⁾) 2.7 ton/m × 400m = 1080 ton(1.00)	(貨)900 + (マ)218 = 1118 ton(1.04)	218 ton(0.20)
最大応力範囲(Δσ)	(1次完成) 62 MPa(0.93) (最終完成) 63 MPa(0.94)	55 MPa(0.82)	25 MPa(0.37)
疲労許容応力範囲	67MPa(1.00)		
100年間の繰り返し回数(N)	在来線: 90本・片道/日 新幹線: 14本・片道/日 104 × 2 × 365 × 100 = 760万本(1.00)	貨物列車 8本/日 × 365 × 100 = 29万本(0.04)	貨物列車以外 143本/日 × 365 × 100 = 522万本(0.69)

2.2 現地計測結果

現地計測は、疲労の影響が大きい、すなわち疲労環境が厳しく疲労等級が低い部材を対象とすることとし、活荷重の影響が大きい吊橋補剛桁主構弦材で製作時AUT検査で大きな「きず」がある部材を選定した。計測位置を図-1に、計測位置の溶接きず寸法を表-1に示す。

測定結果と検討結果を表-2に示す。応力範囲の最大は、貨物列車（下り）とマリンライナー5両（上り）が同時に通過した時の55MPaで、疲労許容応力範囲の82%であった。また繰り返し回数にあたる列車運行回数は151回/日で、設計時に想定した760万回/100年の約73%となっている。

これらの測定結果より、鋼道路橋疲労設計指針³⁾に準拠して算出される疲労寿命は約700年となり、疲労環境的には設計時の想定と比較して安全な状況であると考えられる。

2.3 今後の予定

今回の計測は吊橋主構部材での結果であり、今後斜張橋、トラス橋でも同様の応力範囲の計測を実施し、疲労環境を評価するための基礎データを収集する予定である。

3. 赤外線サーモグラフィによる非破壊調査

3.1 経緯

インフラ構造物の安全性を維持するためには、定期的な検査と構造健全性評価、適切な補修が必要である。補修後には補修による応力低減効果、亀裂再発の可能性を検証することが重要となるが、ひずみゲージ等による従来の計測法では十分な検証ができない場合がある。これに対し、近年注目されている非破壊評価手法として、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力分布計測法がある⁴⁾。ここでは、瀬戸大橋斜張橋の縦桁-横桁交差部の垂直補剛材に発生した疲労亀裂⁵⁾を対象とし、疲労亀裂の補修前後に熱弾性応力測定を行うことで、補修による応力低減効果を検証した。

3.2 現地実測結果

実橋では、疲労亀裂が発生した垂直補剛材に対し、溶接部の応力低減及び応力集中箇所を溶接部から母材部に移すことを目的とした補修を行っている。その補修施工の際に、総重量約200kNの荷重車が計測箇所直上の車線を80km/hで走行した際の熱弾性応力変動を赤外線サーモグラフィにより計測した。補修施工は、(1)垂直補剛材への半円切欠き、(2)溶接部の疲労亀裂除去、再溶接と溶接部止端仕上げ（以下「再溶接」という。）の順で行った。半円切欠き施工前後の垂直補剛材の形状並びに半円切欠き施工前及び再溶接後における熱弾性応力分布状況を図-2に示す。半円切欠き補修施工前では、溶接部の疲労亀裂先端に応力集中が見られるのに対し、再溶接後では切欠きR部に応力が集中している。また亀裂先端近傍（垂直補剛材上端縁部）での応力値が切欠き補修後には低減しており、最大応力作用位置が垂直補剛材上端縁部から切欠きR部に移ったことが示された。これは、疲労強度等級が低い溶接部から疲労強度等級の高い鋼材母材部に応力集中部を移すことにより、溶接部での疲労亀裂の再発を防ぐ補修が的確に施されたことを熱弾性応力計測により検証できたものであると考えられる⁶⁾。

3.3 今後の予定

上記より、現地の補修方法として半円切欠きによる応

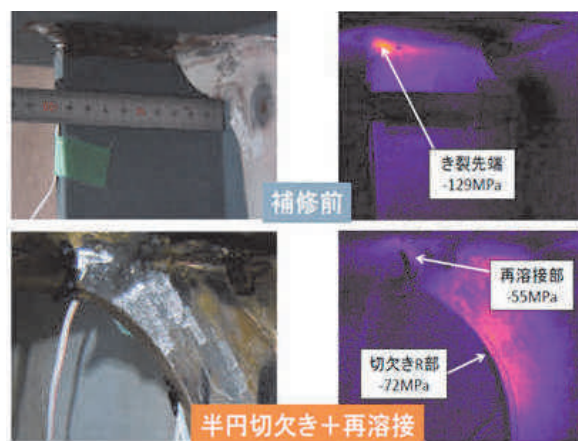


図-2 垂直補剛材板形状及び応力分布

Fig.2 Detail of vertical stiffener and stress distribution

力分散方法を採用することとし、今後は、確実な亀裂先端の除去、再溶接時の品質確保等に留意しながら疲労による損傷の補修を推進していく予定である。

4. まとめ

今回紹介した内容は、疲労亀裂の検出と補修法に関する技術の開発である。これらは検討結果がまとめ次第、順次要領やマニュアルとして整備し実橋への適用を開始している。

疲労関連業務に関する技術開発は、供用年数の増加とともに多岐にわたることが推察される。引き続き疲労に関する点検、診断、補修の維持管理サイクルの改善に向けた技術開発を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針、平成14年5月
- 4) 阪上隆英、西村隆、久保司郎、崎野良比呂、石野和成：自己相關ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔非破壊検査技術の開発（第1報溶接試験片を用いた基礎的検討）日本機械学会論文集A編、Vol.72、No.724、2006-12
- 5) 藤城忠朗：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
- 6) 藤本泰成、溝上善昭、花井拓、阪上隆英、塩澤大輝、東智之、和泉遊以：熱弾性応力測定による鋼構造の疲労き裂補修対策実施効果の検証、土木学会第71回年次学術講演会、2016.9

耐震分科会の取組

Report of Seismic Subcommittee

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

長大橋技術センター
総括・耐震グループリーダー

河藤 千尋 Chihiro Kawatoh

神戸管理センター 計画課長
(前)長大橋技術センター 総括・耐震グループサブリーダー

1. 検討目的及び経緯

保全技術交流会議 耐震分科会では、長大橋技術センターを中心に、保全部、管理センターが一体となり、橋梁の耐震性照査、耐震補強設計、施工計画の立案等を実施している。平成25年度から着手している瀬戸大橋の耐震検討はほぼ計画通りに進捗し、工事発注も進み、平成28年度末には、櫃石島高架橋や番の州高架橋、与島橋のそれぞれ一部ではあるが、耐震補強工事の完了を迎えた。

瀬戸大橋を構成する橋梁は道路鉄道併用橋であることに加え、道路橋示方書の適用範囲を超える長大橋もあり、「本四耐震補強検討委員会」の助言をいただきながら耐震検討を進めてきた。一方、平成28年度から、西瀬戸自動車道の長大橋耐震検討にも着手したところである。

ここでは、平成28年度に、耐震補強設計を完了した瀬戸大橋斜張橋2橋（櫃石島橋及び岩黒島橋）の検討結果を概説する。

2. 耐震性照査と補強設計

2.1 橋梁概要と解析モデル

櫃石島橋及び岩黒島橋は、いずれも、中央支間長420m、橋長790mの道路と鉄道を併用する3径間連続鋼トラス斜張橋である。瀬戸大橋のほぼ中央部に位置する両橋は、岩黒島高架橋をはさんで同じ橋梁形式が採用された双子の斜張橋である。2橋合わせて8基の基礎があるが、陸上部の3基を除くと、5基は海中基礎である。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、直接基礎形式が採用され、海中基礎5基は設置ケーソン工法による直接基礎となっている。本2橋の主桁は、瀬戸大橋の吊橋3橋とは異なり、主構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、主構上弦材だけでは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、併用橋の場合、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。これら2橋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、三角リンクと皿ばねからなるスプリング沓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。

耐震性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。動的解析において、地震による軸力変動と2軸曲げを適切に評価するため、補剛トラス桁、塔、橋脚などの主要部材はファイバー要素によりモデル化し、塑性化の影響を考慮するため材料の非線形特性（局部座屈による剛性低下を考慮）を反映させた。また、ケーブルの非抗圧性を考慮するため、10要素程度に分割して、そのたわみを再現できるようにした。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、主構トラスの格点間は6要素程度に分割することにした。基礎～地盤間の剥離を考慮した非線形性もモデル化するとともに、海中基礎においては、基礎周面に作用する動水圧の影響を付加質量として考慮した。

2.2 耐震性照査の結果

耐震性照査は、上記のとおり、材料非線形と幾何学的非線形を考慮した複合非線形解析により実施した。解析に用いた設計地震動や列車荷重の考え方などは紙面の都合で割愛するが、設計条件等の詳細については参考文献1)及び2)を参照されたい。

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³⁾の軸方向力と曲げモーメントを受ける部材の安定照査式を併用して行った。また、タワーリンク、支承などは、それらを構成する部材の中で最も低い降伏応力相当の耐力や可能移動量等で照査した。

両橋の耐震性照査の結果、2橋とも、大規模地震に対し、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なかった。一方、許容値を超過する応答値が作用する部材は主塔付近の横トラス下弦材のみであり、櫃石島橋では4箇所、岩黒島橋では5箇所に留まった（端橋脚のせん断補強を除く）。損傷が少ない要因として、斜張橋の主要な振動モードの固有周期はおおむね1秒程度以上（主構トラスの橋軸方向及び橋軸直角方向の対称1次振動モードは2.5秒程度以上）の長周期域であり、こ

の範囲において耐震性照査に用いた設計地震動は当初設計に用いられたものとほぼ同等であったこと、さらに、今回の照査では鉄道暫定2線を前提としたのに対し、当初設計では完成4線にて耐震検討が行われており、10%程度上部工重量が軽くなったため、同レベルの地震動に対し、地震時応答が小さくなったと考えられる。

両橋の損傷部位を図-1及び図-2に示す。横トラス下弦材の左側（東側）が損傷した理由は、列車荷重を鉄道桁の左側に単線載荷したためと考えられる。そこで、横トラス断面内の対称性を考慮し、右側（西側）に位置する部材の同等箇所も補強対策を要する箇所とした（図-3）。

2.3 耐震補強対策

櫃石島橋及び岩黒島橋において、地震時に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応力度を満足しないためである。同部材の上下フランジはいずれも十分な剛性を有しているため、ウェブの座屈に対して補強する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）を耐震対策として検討を進めた。補強のイメージを図-4に示す。

補強方法の例を図-5に示す。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1000mm×800mm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。一方、ボルト孔を貫通させずかつ片側（本ケースでは、外側）からだけの施工により

締め付けが可能なTRS（スレッドローリングねじ）の採用の可否について、検討を開始することにした。板厚16mm程度の部材へのTRSによる補強の可能性や施工性、疲労耐久性、また、座屈防止部材としての妥当性などについて実験的な検証を行い、密閉断面を確保した状態でのリブ補強の可否を判断する予定である。

3. まとめ

耐震性照査の結果、櫃石島橋及び岩黒島橋は一部の主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。これら2橋の耐震補強工事は平成30年度頃から開始される予定である。

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年度当初において、与島高架橋の耐震補強設計を残すのみとなった。一方、平成28年度より、西瀬戸自動車道の長大橋耐震検討にも着手している。耐震分科会では、引き続き長大橋の耐震検討を進めるとともに、陸上部橋梁の耐震検討への支援も継続して実施していく。

参考文献

- 1) 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
- 2) 福永勲、角和夫、遠藤和夫：瀬戸大橋の耐震補強検討、本四技報、Vol.36、No.117、pp.36-37、2011.9
- 3) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編、pp.176-181、2012.3

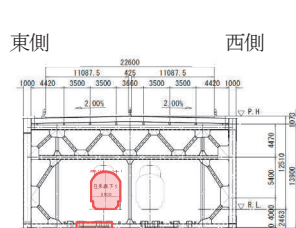


図-1 列車載荷位置と損傷箇所
Fig.1 Damaged Member under Train Load

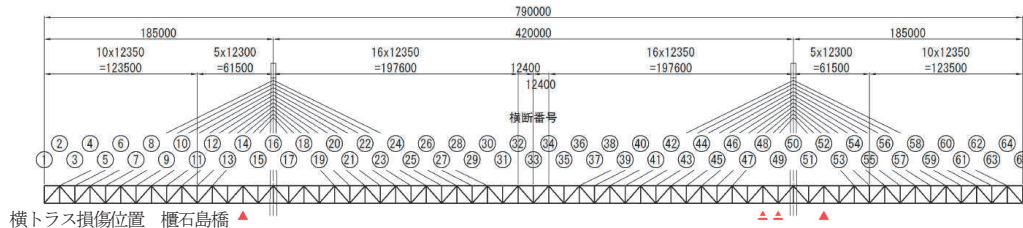


図-2 損傷位置
Fig.2 Location of Members to be Retrofitted

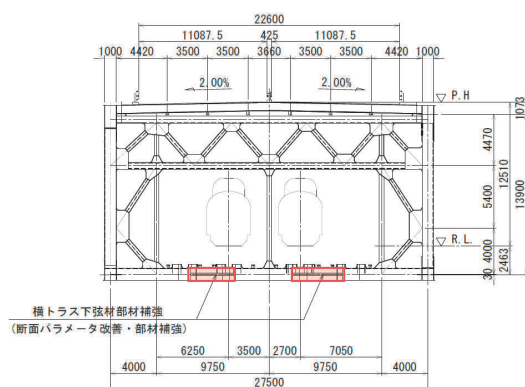


図-3 補強箇所の例
Fig.3 Example of Members to be Retrofitted

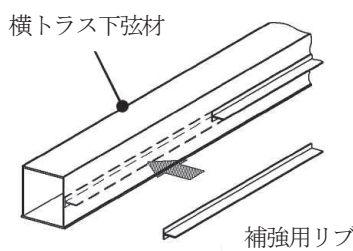


図-4 補強イメージ
Fig.4 Example of How to Retrofit

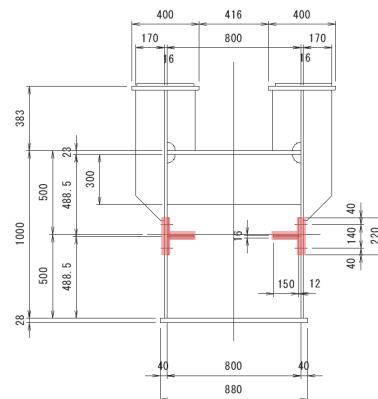


図-5 補強方法の例
Fig.5 Example of Seismic Retrofit

耐風分科会の取組

Report of Wind-Resistance Subcommittee

楠原 栄樹 Shigeki Kusuvara

しまなみ今治管理センター所長
(前) 長大橋技術センター
防食・耐風グループリーダー

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

1. 検討目的及び経緯

保全技術交流会議耐風分科会では、設計時に耐風安定性確保のために必要とされた対策について、合理的な維持管理を実現するための再評価を行っている。

本稿では、瀬戸大橋三吊橋の維持管理上の課題となっている床版グレーチングについて、耐風性の観点から再評価した結果について報告する。

2. 吊橋床版グレーチング閉塞可能範囲の検討

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）の道路床版の路肩に設置されているグレーチングについては、耐風安定化部材としての役割を果たしているものの、路面落下物などがすり抜け、トラス桁内を走行する鉄道の運行に影響を与える可能性があるなど、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部分的に閉塞した場合の橋梁全体系の耐風性への影響について確認し、閉塞可能範囲について検討を行った。

今回グレーチングの閉塞可能範囲を評価するのにあたっては、橋軸方向の桁断面の変化を考慮できる評価方法として、三次元フラッター解析を用いることとした。解析に必要となる桁断面に固有の空力性能（非定常空気力係数、三分力係数）については、共同研究を実施した横浜国立大学の風洞試験（写真-1）によって計測を行った。

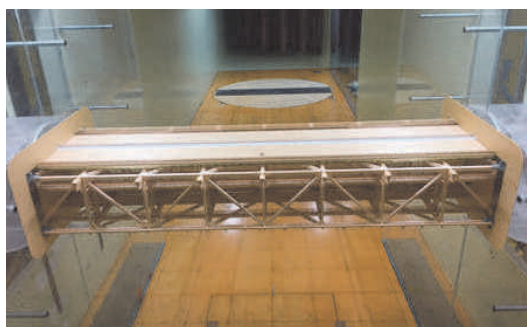


写真-1 二次元風洞模型

Photo 1 Two dimensional wind tunnel test model

グレーチング閉塞範囲の評価方法としては、全径間グレーチング設置状態を初期状態とし、側径間側から中央径間中央に向けて段階的に中央部グレーチング（追越車線側）を閉塞した橋梁系において三次元フラッター解析を実施し、どの段階までフラッター照査風速を満足するかを確認した。

検討の結果を図-1に示す。全ての吊橋において、側径間全体と、中央径間の広い範囲においてグレーチングの閉塞が可能であることが確認された。

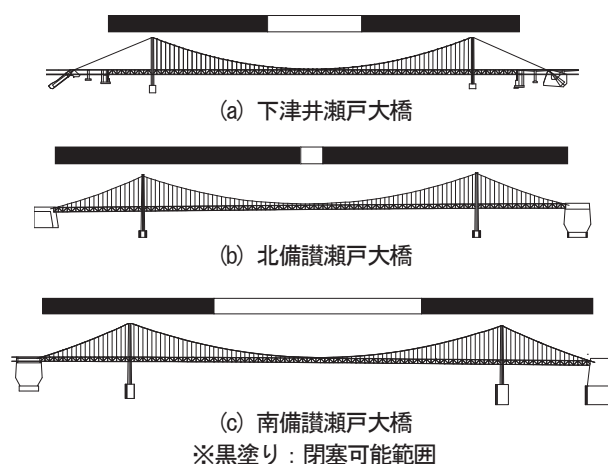


図-1 グレーチング閉塞可能範囲

Fig.1 Portions where gratings can be closed

3. まとめ

瀬戸大橋吊橋について、最新の耐風性検証手法を用いて、グレーチング閉塞可能範囲の検証を行った。今後は、更に追加の耐風安定化対策により、グレーチング閉塞可能範囲の拡大について検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 楠原栄樹、勝地弘、内藤将志、山根彰、町田陽：維持管理性を考慮した長大吊橋の耐風安定化対策の検討、構造工学論文集 63A 巻、pp.430-437、2017.3
- 2) 楠原栄樹、山根彰、花井拓、町田陽：下津井瀬戸大橋の耐風安定性に関する一考察、土木学会第72回年次学術講演会、2017.9

韓国NAH社との技術交流

Technical information exchange with NAH, Korea

2017年2月2日～3日、韓国インチョン市にて、新空港高速道路株式会社（New Airport Hiway Co., Ltd. 以下「NAH 社」という。）と、ケーブル送気乾燥システムの現状について、技術交流を実施しました。

NAH 社は、ソウル近郊と仁川国際空港を結ぶ 38.2km の高速道路の建設を韓国道路公社から引き継ぐために、1995 年 12 月に設立された高速道路会社です。現在、同道路の維持管理、運営を実施しています。2000 年 12 月から供用を開始したこの高速道路は、韓国で初めて民間資金のみによって建設されたもので、NAH 社は、Samsung Corporation（当時）など 11 社の民間会社によって設立された完全に民間の道路会社です。仁川国際空港へのアクセス道路はこの道路の他に、仁川大橋を通るルートもあります。NAH 社が管理する新空港高速道路は、現在、空港利用交通量の約 63%を分担しています。最近の交通量は約 77,000 台／日、乗用車の通行料金は 6,600KRW（約 660 円）です。

新空港高速道路のほぼ中央部に、永宗大橋と呼ばれる全長 4,420m の橋梁があります。この橋梁はトラス橋・吊橋・箱桁橋から構成されているのですが、その吊橋が世界初となる三次元形状の主ケーブルを有する自碇式吊橋（中央支間長 300m。写真-1 及び図-1 参照）です。永宗大橋はダブルデッキ構造であり、上段側には往復 6 車線の高速道路、下段側には往復 4 車線の高速道路と鉄道上下線 2 軌道が供用しています。世界でも有数の交通容量を有する吊橋の一つと言われています。永宗大橋の建設期間は、1995 年 12 月から 2000 年 12 月まで、約 60 ヶ月間を要しました。建設費は 8130 億 KRW（約 813 億円）でした。

この吊橋は自碇式のため、桁上に位置するケーブル定着部の面積が狭いこともあり、吊橋の主ケーブルは AS 工法により架設されました。ケーブル素線径は 5.1mm、強度は 1570MPa の韓国製です。主ケーブルは S 字ラッピングの後、ゴム系の塗装が施され、さらに、防食方法として、建設当時より、ケーブル送気乾燥システムが導入されています。

「ケーブル送気乾燥システム」を技術交流のテーマとした今回、お互いのシステムの現状を報告し合い、意見交換を行いました。本システムは、本四高速が世界に先駆けて開発した吊橋主ケーブルの防食対策であり、ほぼ同様の機器により構成されるシステムが、永宗大橋の吊橋両主塔の水平材の中に設置されています（図-2 及び写真-2 参照）。主ケーブル片側あたり、乾燥空気の注入口は 4 箇所、排出口 5 箇所、設けられています。システムの管理上、重要な指標となる相対湿度のターゲットは 40%未満に設定されています。湿度の高くなる夏場には 50%程度まで上がるがあるとのこと。60%を限界

状態として、それを超えないような能力を有する設備となっています。NAH 社のシステムは供用以降、連続運転されており、これまで良好に稼働し、主ケーブルの防食対策として効率的・効果的な手法であると高く評価されていました。定期的な点検の結果でも、ケーブル素線の腐食は確認されていないとのこと。稼働開始して約 17 年を経過するということもあり、NAH 社はシステムの性能が低下する前に、更新計画を立案する意向です。



写真-1 永宗大橋

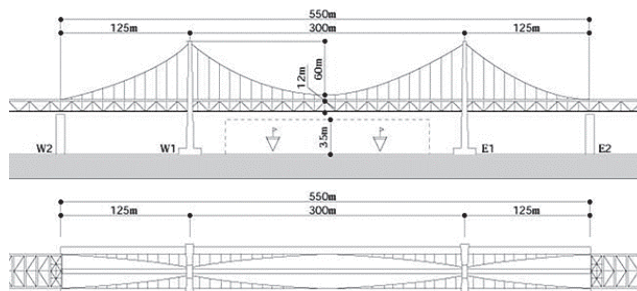


図-1 永宗大橋一般図

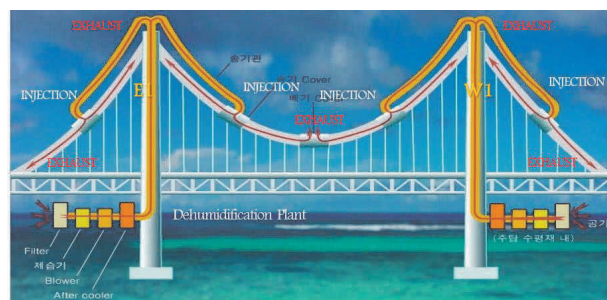


図-2 ケーブル送気乾燥システム 全体概要



写真-2 ケーブル送気乾燥システム 機器

（長大橋技術センター 総括・耐震グループリーダー
西谷雅弘）

第15回REAAA道路会議（インドネシア）

15th REAAA Road Conference, Indonesia

第15回アジア・オーストラレーシア道路技術協会（The Road Engineering Association of Asia and Australasia、以下「REAAA」という。）道路会議が、2017年3月22日～24日の日程で、インドネシアのバリ島で開催されました。REAAAは、アジア太平洋地域の国々において、国内外の専門的、商業的相互関係を発展させることにより、道路技術や関連する専門技術の向上、またその実施促進を図ることを目的に、1973年に設立された組織です。REAAA道路会議は、おおむね3年ごとに開催され、東南アジア各国を中心に多くの技術者等が参加しています。

今回の会議は、「Road for Better Living」をテーマに、IRF Global Road Summitと同時開催で行われました。会議では、基調講演、論文発表、ワークショップ、展示会、テクニカルビジット等が行われました。また、本会議に先立ち、若手技術者会議も行われました。本四高速からは、しまなみ今治管理センター道路維持課 坂本が日本の若手技術者の一員として参加しました。

若手技術者会議は、40歳以下の若手技術者を対象に、各国の若手技術者の情報交換と技術交流の場として設けられた会議で、2016年10月の東京に引き続き行われました（写真-1）。この会議では、過去の若手技術者会議のレビューから始まり、各国の若手技術者による活動報告や各国からの技術プレゼンテーションが行われました。若手技術者による活動報告では、若手技術者のメンバーが中心となって実施した技術講習や現場見学会の開催及びアスファルト舗装の維持管理に関する会議などが報告されました。また、技術プレゼンテーションでは、斜長橋の建設プロジェクト、若手技術者による州道路の維持管理などの紹介が行われました。

本会議では、開会式（写真-2）と基調講演に引き続き、論文発表が行われました。論文発表は、5つのテーマに沿った53編で行われ、道路の点検、舗装関連技術、都市計画、ITSなど多岐に渡って報告されました（写真-3）。その中で、インドネシアで採掘される天然ロックアスファルトのグースアスファルトへの適用に関する報告など長大橋に関連する発表も行われました。また、会議期間中に展示会が開催され、ガードレールなどの交通安全施設、舗装補修材料、建設プロジェクトの紹介が行われました。

会議の翌日には、テクニカルビジットが開催され、バリ島内の国立公園の視察を行いました。また、視察途中にバリ島で唯一の高速道路であるバリ・マンダラ有料道路を見る機会を得ました。バリ・マンダラ有料道路は、2013年9月に供用したベノア湾上の海上12.7kmの有料道路で、全て高架橋の形式を採用しています（写真-4）。本道路は、供用から約4年と新しいため、路面の損傷等はなく、健全な状態でした。



写真-1 若手技術者会議



写真-2 第15回REAAA道路会議 開会式



写真-3 論文発表

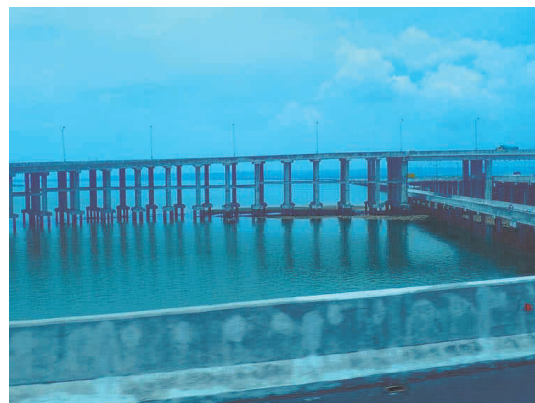


写真-4 バリ・マンダラ有料道路

（しまなみ今治管理センター 道路維持課 坂本佳也）

斜張橋耐震固定装置用ばねのばね技術遺産認定

Recognition of the spring of aseismatic facilities for cable-stayed bridges as Spring technological heritage

瀬戸大橋の中の櫃石島橋と岩黒島橋の耐震固定装置に使用されている「皿ばね」が、「斜張橋耐震固定装置用皿ばね」として日本ばね学会の「ばね技術遺産」に認定されました。認定証の贈呈式が6月15日に開催された日本ばね学会総会にて行われました。

認定された「ばね技術遺産」とは、日本ばね学会が2013年より始めた制度で、日本に機械産業が芽生え、発展した明治、大正、昭和の時代に使用された機械や製造されたばね製品の中で、ばねの発展に寄与し、歴史的価値があるものが認定されます。昨年度までに25件が認定されており、2017年は当社が管理している「皿ばね」を含めて5件が認定されました。

この「皿ばね」が使用されている櫃石島橋と岩黒島橋の耐震固定装置は、本州四国連絡橋の中でも特徴的な装置です。この耐震固定装置は地震による橋桁の振動を抑える役割を担っており、写真-1に示す位置、櫃石島橋と岩黒島橋の橋桁両端の橋脚にそれぞれ2基（写真-2参照）、両橋で8基設置されています。耐震固定装置の構造は、図-1に示すように振動を抑制するスプリング沓と、スプリング沓と橋桁をつなぐ三角リンク及びエンドリンクより構成されており、スプリング沓の中に「皿ばね」が設置されています。

図-1のB-B断面図に示すように、スプリング沓には5列の皿ばねが組み込まれており、1列に直径700mm、厚さ32mm、重量72kgという巨大な「皿ばね」が68枚使用されています（写真-3参照）。そのため、1基のスプリング沓の皿ばね数は340枚、2橋合計で2,720枚の「皿ばね」が使われています。これらの「皿ばね」を製作した実績、組み立てたスプリング沓の性能と安全性の確認のために全数載荷試験を行った実績、設置から現在まで30年以上使用されている実績、それらを総合して認定基準の一つである「ばね機能の応用を主な特徴とする歴史的な機械装置あるいは輸送機器」とであると認められたものです。

この「皿ばね」は交換が可能な設計となっていますが、長期間さびずに使用できるように、スプリング沓の中には、「皿ばね」を含

む制振機構と一緒にタービン油を入れた、オイルバスと呼ばれる防せい方法が採用されています。

当社は長大橋を供用後200年以上維持管理し、現役で利用されることを目指しており、「皿ばね」を含む耐震固定装置も長期間の使用を目指して万全な維持管理を行っていきます。



写真-1 耐震固定装置(スプリング沓含む)位置

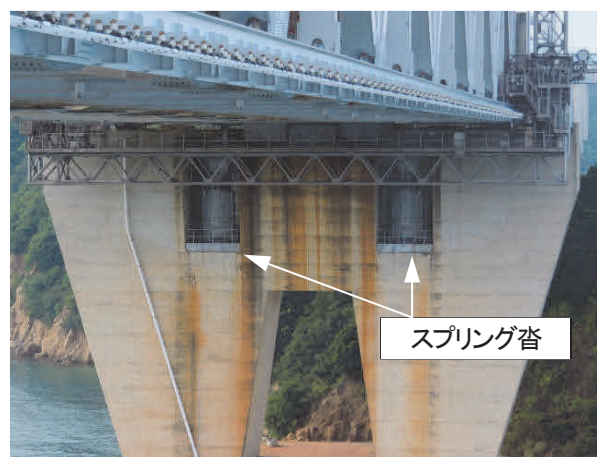


写真-2 スプリング沓設置状況

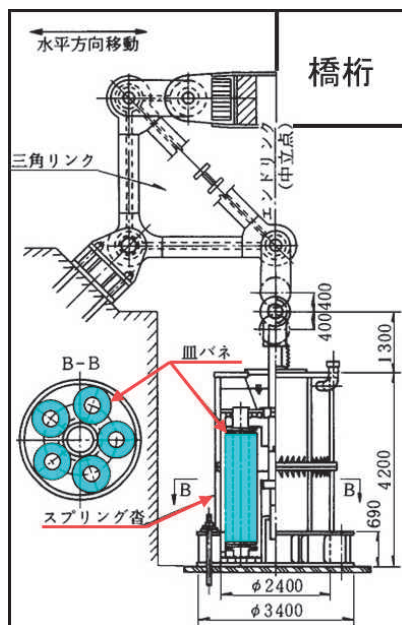


図-1 耐震固定装置全体図



写真-3 製作中のスプリング沓

(東京事務所 技術調整課長 大谷康史)

文 献 紹 介

本州四国連絡橋関連技術文献紹介 (17.02～17.07)

題 名	著 者	雑誌名等	巻	号	年月	頁
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	溝上善昭 小林義弘 和泉遊以 阪上隆英	日本鋼構造協会鋼構造論文集			201509	10
電着防食と電気防食を併用した大水深鋼ケーソンの防食方法に関する検討	竹口昌弘 北村岳伸	高速道路と自動車	59	6	201606	4
走査加熱を用いたコンクリート構造物のアクティブサーモグラフィ非破壊検査試験	溝上善昭 花井拓 阪上隆英 竹内優人 和泉遊以	日本材料学会			201610	4
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	溝上善昭 森山彰 花井拓	国土技術研究会発表論文集			201611	6
熱弾性応力可視化計測による鋼橋梁の疲労き裂補修効果の検証	寺内勇希 藤本泰成 東智之 塩澤大輝 阪上隆英 溝上善昭 森山彰	日本機械学会学生員卒業研究発表講演会講演前刷集			201703	1
Verification of the repair effect for fatigue cracks in members of steel bridges based on thermoelastic stress measurement	阪上隆英 溝上善昭 塩澤大輝 藤本泰成 和泉遊以 花井拓 森山彰	Engineering Fracture Mechanics Elsevier Ltd.			201703	12
吊橋センターステイロッドの疲労強度	富永翔子 坂野昌弘 森山彰 溝上善昭 奥村淳弘	土木学会関西支部年次学術講演会			201705	2
非破壊検査のための非接触音響探査法に関する研究ー遠距離計測に関する検討ー	杉本恒美 杉本和子 上地樹川上明彦 黒田千歳、歌川紀之	物理探査学会年次学術講演会論文集	136		201706	2
ASR劣化状態の異なるコンクリートにおけるシラ系系表面含浸材の水分逸散性能と劣化抑制効果に関する検討	川合将斗 谷河雅大 森川英典 楠原栄樹	日本コンクリート工学会コンクリート工学年次論文集	39		201707	6
遠距離音波照射加振を用いた非接触探査法の欠陥検出アルゴリズム	杉本恒美 杉本和子 川上明彦 歌川紀之	日本コンクリート工学会コンクリート工学年次論文集	39		201707	11

※本四技報，技術発表会は除外。

本四技報編集委員会・幹事会名簿(五十音順)平成29年8月31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		池田秀継
	臼田幸生		薄井稔弘
	大谷康史		岡本豊夫
	梶尾光邦		久米昌夫
	貴志友基		敷地直城
	古村学彦		大東丈朗
	竹内政彦		高木久策
	竹口昌弘		寺嶋賢樹
	西谷雅弘		遠山直樹
	林昌弘		中川秋男
	村田知司		花井拓
	山口和範		溝上善昭
	吉本紀一		森幸夫
			弓山茂樹

本四技報 第129号

発行 平成29年9月15日
編集・発行 本州四国連絡高速道路株式会社
印刷 有限会社 セキグチ

本州四国連絡高速道路株式会社
Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited
〒651-0088 神戸市中央区小野柄通4-1-22
アーバンエース三宮ビル内
電話番号：078(291)1000(代表)
<http://www.jb-honshi.co.jp>



