

# 本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.46 No.137 2021.9

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 137 号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.137

## 【巻頭言】

技術をつなぐために……………小林 義弘… 1  
Technology inheritance for bridge engineers

## 【技術論文】

来島海峡大橋主ケーブル開放調査……………馬 詰 大地・薄 井 稔 弘・大 西 諒… 2  
Internal main cable inspection of the Kurushima-Kaikyo Bridges

因島大橋ケーブル上段ハンドロープの張力再導入……………本 郷 誠 人・矢 野 賢 晃・門 田 整 達… 9  
Reintroducing of the top hand rope tension of the Innoshima Bridge cable

ケーブル部材の状態が長大吊橋の構造安全性に及ぼす影響に関する解析検討……………金 田 崇 男・有 馬 敬 育…15  
Analytical study on the effect of the condition of cable members on the structural safety of a long-span suspension bridge

地域間産業連関表による本四高速道路の経済効果分析……………片 山 雄 也・小 山 智・佐 藤 高 通…25  
Economic effect analysis of Honshu-Shikoku Bridges based on inter-regional input-output tables

## 【技術開発年次報告】

防食分科会 塗装（鋼）WG の取組 ……………竹 口 昌 弘・白 田 幸 生・山 根 彰…30  
Report of Working Group for Metal Coating System, Anticorrosion Subcommittee

防食分科会 コンクリート保護工 WG の取組 ……………大 賀 弘 貴・竹 口 昌 弘…31  
Report of Working Group for concrete coating system, Anticorrosion Subcommittee

防食分科会 海中基礎防食 WG, ケーブル送気 WG,  
ハンガーロープ・斜ケーブル WG, 橋梁付属物 WG の取組 ……………村 上 博 基・橋 本 龍…32  
Report of Working Group for anticorrosion for underwater foundations, cable dehumidification system,  
suspender rope, stay cable and bridge accessories, Anticorrosion Subcommittee

疲労分科会の取組……………西 谷 雅 弘・有 馬 敬 育・内 野 隆 太 郎…34  
Report of Fatigue Subcommittee

耐震分科会の取組……………西 谷 雅 弘・金 田 崇 男…40  
Report of Seismic Subcommittee

舗装分科会の取組……………村 上 博 基・中 山 義 雄…41  
Report of Pavement Subcommittee

点検分科会 点検技術 WG の取組 ……………西 谷 雅 弘・有 馬 敬 育・金 田 崇 男・内 野 隆 太 郎…42  
Report of Working Group for Inspection Technology, Inspection Subcommittee

点検分科会 点検システム WG の取組 ……………後 藤 敦…50  
Report of Working Group for Inspection System, Inspection Subcommittee

耐風分科会の取組……………竹 口 昌 弘・遠 山 直 樹…51  
Report of Wind-Resistance Subcommittee

## 【技術ニュース】

2020 年度日本機械学会関西支部賞（技術賞）受賞 ……………有 馬 敬 育…53  
2020 JSME Kansai branch Technique Award

今井経営計画部長 2020 IABMAS SENIOR PRIZE 受賞 ……………池 田 秀 継…53  
Dr. Imai was awarded 2020 IABMAS SENIOR PRIZE

吊橋ケーブル送気乾燥システム「土木技術十二選」に選定される……………遠 山 直 樹…54  
Dry air injection system for suspension bridges selected as one of the best 12 civil engineering technologies

## 【文献紹介】

本州四国連絡橋関連技術文献紹介……………55  
Technical articles related to Honshu-Shikoku Bridges

---

# 来島海峡大橋主ケーブル開放調査

Internal main cable inspection of the Kurushima-Kaikyo Bridges



写真-1 内層素線観察状況  
Photo 1 Observation of inside cable wire

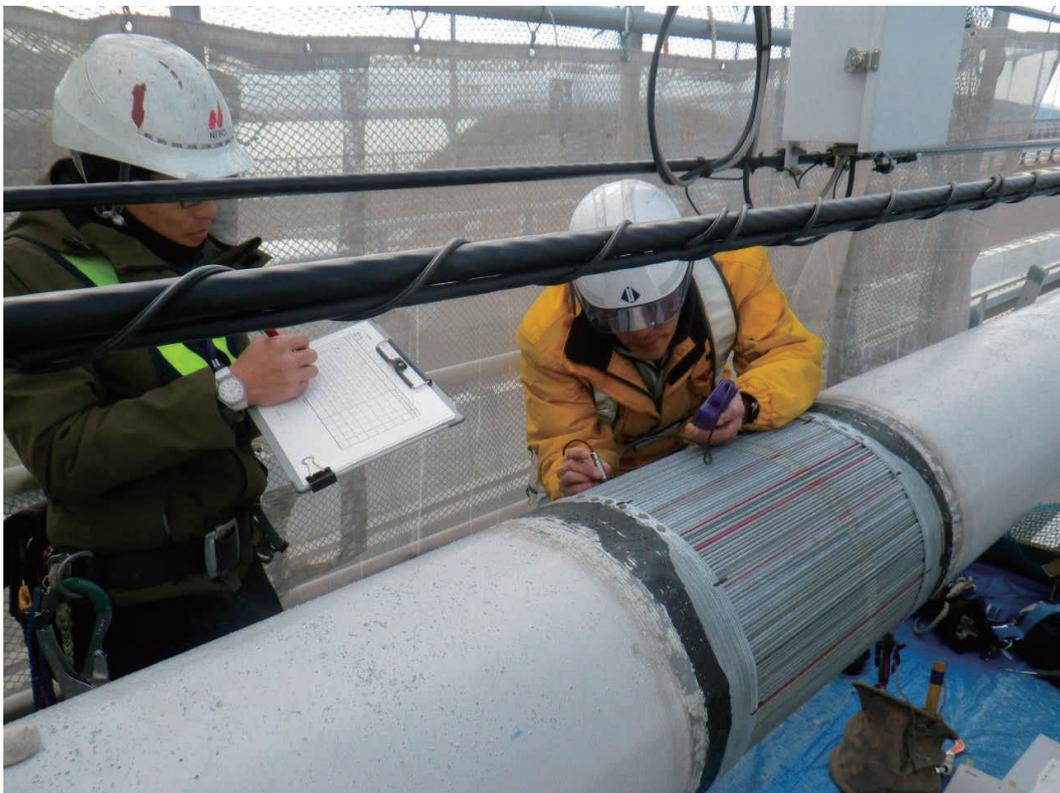


写真-2 めっき厚さ計測状況  
Photo 2 Measurement of galvanization thickness

# 因島大橋ケーブル上段ハンドロープの張力再導入

Reintroducing of the top hand rope tension of the Innoshima Bridge cable

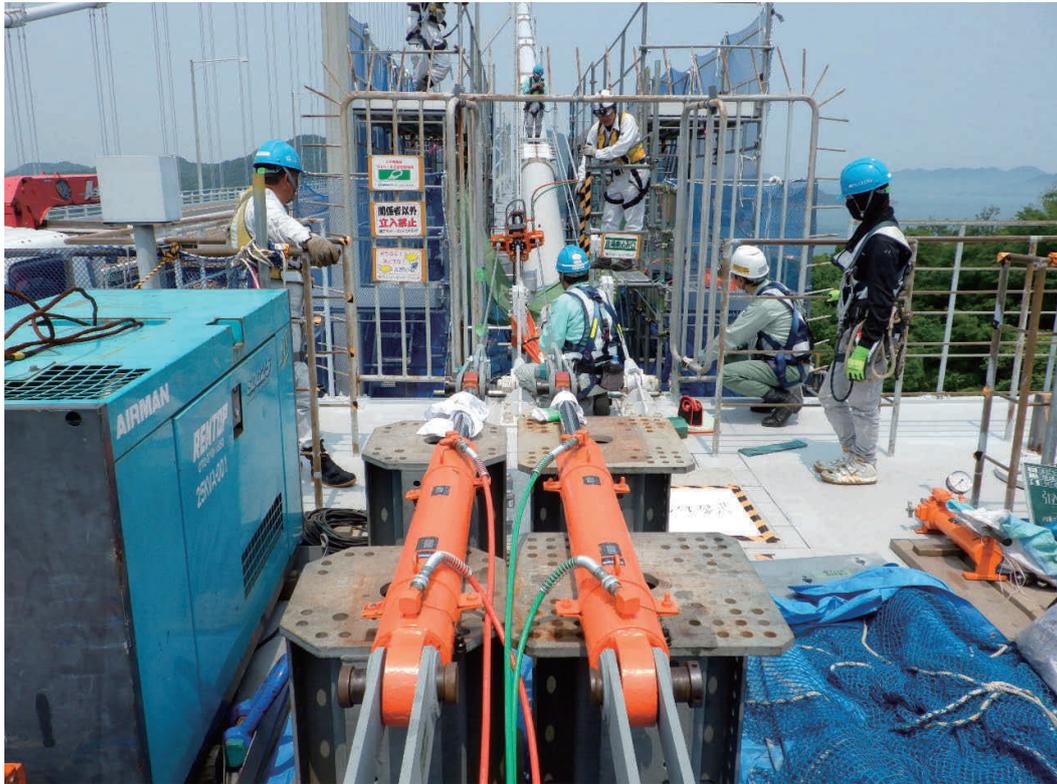


写真-3 ハンドロープの張力再導入状況

Photo 3 Reintroducing of the hand rope of side span



写真-4 ターンバックル連結完了

Photo 4 Turnbuckle installed in the hand rope of center span

# 技術をつなぐために

Technology inheritance for bridge engineers

執行役員 保全部長 小林 義弘

Yoshihiro Kobayashi

## (はじめに)

長大橋技術の継承が必要と言われて久しい。しかし、現在、技術継承が十分円滑に進んでいるかと言えば、必ずしもそうではないと感じている。これまで取り組んできた社員や取り組み方を責める訳ではなく、全社を挙げて技術継承を目指す取り組み方をどうすべきか、私見であるが取り上げたい。

## (長大橋建設技術の継承)

技術継承に本格的に取り組み始めたのは、平成 11 年度に長大橋技術センターが組織され、海峡横断プロジェクト等長大橋梁計画の受託業務をしたときではなかったか。海峡横断プロジェクトは、紀淡海峡などの 6 つの海峡横断計画や長崎県、兵庫県等の自治体架橋計画を受託し、若手を含む専門グループが本四架橋の知見と反省を踏まえて技術検討するものであった。筆者も、若手ではないその内の一人であるが、大学、土木研究所、他公団、企業等の技術者と触れあう取組を通じて、技術水準を上げることができたと思う。この時点では、将来の長大架橋プロジェクトに関与するという目的意識があったと思う。しかし、海峡横断プロジェクトは、10 年以上前に凍結され、長大橋建設に関与する機会は、著しく減少した。

## (何のための技術継承?)

では、それ以降の技術継承の取組はうまくいったのか? 現在行われている取組は、技術研修(座学)以外には、長大橋に係る技術向上プロジェクト、他組織における長大橋建設への派遣、技術発表会、保全現場研修、各管理センターにおける個別の教育等である。だが、全社を挙げて体系的に取り組む、社員の理解を得ながら成功しているとは、残念ながら言えないのではないかな。

そもそも、当社(グループを含む)における技術継承とは、何なのだろうか? 国語辞典に拠れば、継承とは「先代や前任者の地位・身分・財産などをそっくりそのまま受け継ぐこと」となっているが、継承する技術(スキル)は、何なのか? その点を、十分に議論してきたのだろうか? また、そっくりそのまま受け継ぐことで満足して良いのだろうか?

会社の存在意義と照らして考えるとき、技術継承は目的でなく手段である。本四会社の経営理念のひとつは、安全・安心・快適に道路を使っただけのために、長期に渡り構造物を万全な状態に保つことである。このためには、構造物の性質や成り立ちを十分に理解しておく必要がある。だから、特に知見の少ない長大橋技術については、継承しておくことが必要だ。という理屈であろう。

しかし、それでは、あまりにも漠然としているのではないだろうか。伝承する側も継承する側も普段の業務で十分忙しい。背中を見て憶えろと言われても、若い人たちはそのような環境に育った世代ではない。集められて講義をされたり、現場を見せられたりするだけでは努力した成果や喜びが感じられないのではないかな。

## (技術継承をすすめるために)

会社が体系的に取り組む上で、特に考慮すべき点は、主に 3 つあると思う。

1 点目は、業務に必要な知識や技術の内、継承する具体的項目を厳密に選別することである。次世代グランドデザインを目指すべき姿「長大橋建設プロジェクトにも参画できる技術者集団となる」、また基幹事業の高速道路保全事業を安定かつ発展させるなどの目的について、必要な継承項目を選別し、それが会社にとってなぜ必要なのかを明確にし、全社員に明示することが必要である。

2 点目は、継承者が、継承できたことを実感できる仕組みを作ることである。例えば、社内資格や CPD でもいい。成果を見える化することである。

3 点目は、社員が熟考する必要がある業務を増やして、単に知識を使う業務は、AI などに任せることである。技術の継承においては、新しい知見を加えて発展させていくべきであり、技術者として自身で考える経験を増やすことが重要となる。そのためには、働き方を変え、時間を生み出す取組が必要となる。

会社は、これらを踏まえ、グループを含め業務の役割分担を明確にし、必要な技術や技能項目の効果的な継承方法を作り上げていく。また、伝承する側は、グループ全体を対象とした専属の組織を設けて行うことが必要であろう。

一方で、社員個人としては、知識の底上げ(資格取得)には積極的に取り組んでいただきたい。そのため、個々の業務におけるルーチンワークを極力排除し、技術力向上に資する業務に時間を費やして欲しい。資格取得に対する会社のバックアップは、大いに拡大している。また、私的な組織ではあるが、「本四高速グループ技術士会」がこの 8 月から立ち上げられ、技術士取得の助力を計画している。

## (おわりに)

社内の建設経験技術者が高齢化し減少していく中、長大橋技術の継承は、全社員の意識改革がなされないと、達成できないものと思う。簡単ではないが、残された時間はわずかである。

# 来島海峡大橋主ケーブル開放調査

Internal main cable inspection of the Kurushima-Kaikyo Bridges

馬詰 大地 Daichi Umadume

しまなみ今治管理センター  
橋梁維持グループ

薄井 稔弘 Toshihiro Usui

しまなみ今治管理センター  
橋梁維持グループリーダー

大西 諒 Ryo Onishi

しまなみ今治管理センター  
橋梁維持グループ

## 概要

来島海峡大橋では、主ケーブルの防食を目的として、主ケーブル内部に乾燥空気を送り込んで高強度亜鉛めっき素線の腐食を抑制するケーブル送気乾燥システム及び従来の丸ワイヤと比較して気密性を保つことのできるS字型ラッピングワイヤを採用している。供用20年後の状況確認を目的として、来島海峡第一大橋及び第三大橋で主ケーブルの開放調査及び主ケーブル内湿度の雨水浸入による雨天連動の確認を行った。

その結果、12年前の調査結果と比較しても素線の白さびの進展は見られず健全であり、付着有害物質も微量で腐食が進行する可能性は低いことが分かった。また、主ケーブルに塗膜割れが確認されているものの主ケーブル内部の雨天連動は確認されずケーブル送気乾燥システムが十分に機能しており、主ケーブルに悪影響を与えるものではないと考えられた。

On the Kurushima-Kaikyo Bridges located in the Shikoku side of Nishi-Seto Expressway, the dry air injection system and S-shaped wrapping wire are applied for the purpose of corrosion protection of main cables. The former is a facility in order to keep dry inside of the cable by sending dry air and the latter is a kind of wrapping wire to improve the airtightness of the cable. A cable survey to see the condition of main cables and the effect of the system was conducted in 2019, 20 years after the start of service.

By the survey, it was found that the area of white rust on main cable wire was not expanded, only a small amount of harmful substances were observed, and there were also some cracks on the coating paint of main cables. As a result of examining the results of this investigation, it was concluded that the anticorrosion system of the main cable is fully functioning and the possibility of corrosion progressing is small.

## 1. はじめに

吊橋の主ケーブル(以下「ケーブル」という。)は、吊橋を構成する部材の中で最も重要な部材であり、損傷を受けたり腐食したりすると取替えが困難であることから長期にわたる耐久性を確保するために確実な防食が必要である<sup>1)</sup>。

来島海峡大橋では、ケーブルの遮水性を向上させるとともに、内部の腐食環境を改善させるために、建設時よりケーブル内部に乾燥空気を送り込んで腐食を抑制するケーブル送気乾燥システム(以下「送気システム」という。)(図-1, 2)及び気密性を保つことのできるS字型

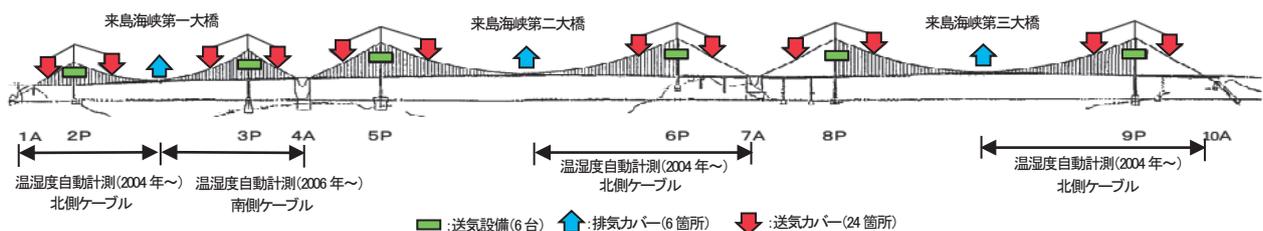


図-1 来島海峡大橋ケーブル送気乾燥システム配置図

Fig.1 Dry air injection system of Kurushima-Kaikyo Bridges

ラッピングワイヤ(S字型ラッピングワイヤ+ケーブル用柔軟型塗装, 膜厚195 $\mu$ m)を採用している. また, 大島大橋でも供用後10年が経過した1998年に送気システムを導入しており, しまなみ今治管理センター管内の吊橋(以下「管内吊橋」という.)において, ケーブル内の相対湿度の安定化を図るとともに, ケーブル管理の一環としてケーブル内の温湿度のモニタリングを行っている.

供用後20年が経過した来島海峡大橋では, ケーブルバンド部のシーリングの劣化やケーブルの塗膜割れ等の変状が報告されており, ケーブル素線内への雨水の浸入や乾燥空気の漏洩等による防食性能の低下が部分的に懸念されている.

以下に, 供用20年後の状況確認としてケーブルの外層素線・内層素線の外観目視調査及び付着有害物質の測定等のケーブル開放調査結果, モニタリング結果の分析によるケーブル内湿度への雨天連動の影響確認及びその評価について述べる.

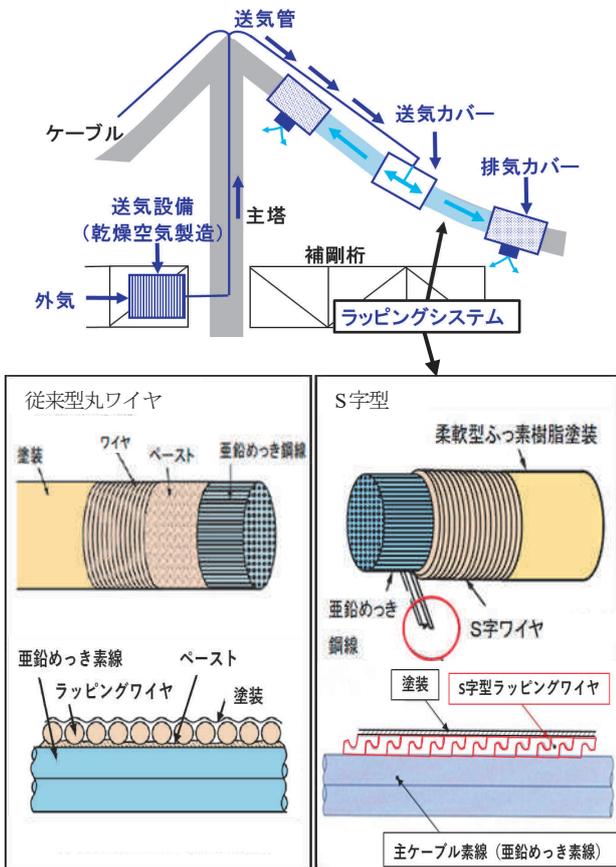


図-2 ケーブル防食システム概略図  
Fig.2 Corrosion protection system for cable

## 2. ケーブルの維持管理の現状

### 2.1 来島海峡大橋における送気システム

高強度亜鉛めっき素線の腐食の進行は湿度により異なり, 一般に相対湿度 60%RH 以下ではほとんど進行しないといわれている<sup>2)</sup>. これに基づき本四高速ではケーブル内の相対湿度を 40%RH 以下に保つことを目標として

送気システムを運転している<sup>3)</sup>.

来島海峡大橋の送気システムは, 各主塔の中間水平材に設置した送気設備において塔内の空気をフィルタユニット吸込口から吸い込み, 除湿機ユニットに組み込んだシリカゲルロータに空気中の水分を吸着し乾燥させた空気を送気カバーからケーブル内に送気する乾式除湿である. また, 夏季における除湿能力を補うためヒートポンプ等で冷媒を冷却・加熱し空気中の水分を結露させて除湿する湿式除湿機(以下「プレクーリング設備」という.)を併用し, ケーブル内の相対湿度を管理基準以下に保つようになっている<sup>4)</sup>.

維持管理においてはケーブル内の温湿度のモニタリングを実施しており, ケーブル内の相対湿度の自動計測は来島海峡第一大橋の北側ケーブル 1/2 区間, 南側ケーブル 1/2 区間, 第二大橋の北側ケーブル 1/2 区間及び第三大橋の北側ケーブル 1/2 区間で行い, 1 時間ごとの温湿度データを取得している. また, 自動計測の有無にかかわらず「吊橋ケーブルの送気乾燥による防食システム設計・施工・維持管理指針(案)」<sup>3)</sup>(以下「指針」という.)の「ケーブル送気システム計測マニュアル(案)」に基づき全区間において高温多湿期である夏季(6~8月)に1回/年の頻度でポータブル型の温湿度計を用いて手動計測(写真-1)を実施している. 指針に基づき, 測定日は送気設備稼働中であつ雨天時から 48 時間以上の間隔を空けた日としている.



写真-1 手動計測状況  
Photo1 Manual measurement

### 2.2 相対湿度の現況

図-3, 4 に手動計測による来島海峡第三大橋 8P 主塔付近(2003 年から 2019 年の夏季)における北, 南側ケーブル内の相対湿度を示す. 来島海峡第三大橋では, 2000 年代前半より試験的にプレクーリング設備を導入し 2012 年と 2014 年に改造を実施している<sup>4)</sup>. 2012 年より前は高温多湿期である夏季に, 一時的に相対湿度 40%RH の管理基準を超える箇所が見られた. 一方, 2012 年以降は, プレクーリングによる除湿能力の向上により相対湿度を 40%RH 以下に保つことができている. 来島海峡第一大橋, 第二大橋に関しても同様の傾向で, 改造以降観測された相対湿度のデータはほぼ 20%RH 以下であり, ケーブル内部は安定して相対湿度が低い環境をおおむね保つことができている.



図-3 来島海峡大橋8P主塔付近北ケーブル相対湿度  
Fig.3 Relative humidity(Kurushima-Kaikyo Bridge 8P north cable)

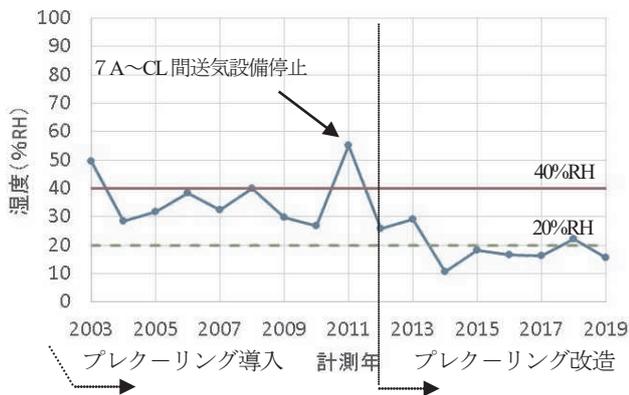


図-4 来島海峡大橋8P主塔付近南ケーブル相対湿度  
Fig.4 Relative humidity(Kurushima-Kaikyo Bridge 8P south cable)

### 2.3 主なケーブル変状とその補修

管内吊橋では、ケーブルバンド及び送気・排気バンドの合わせ部・端部等におけるシーリングの劣化やケーブル塗膜割れ等の変状が供用後約8年が経過した頃から顕著に確認されている。これらの変状はケーブル内の気密性を失いケーブル内乾燥空気漏洩、外部からの水分や腐食促進物質の侵入要因となる。よって、管内吊橋のケーブルバンドや送気・排気バンド等のシーリング補修を継続的に行い、ケーブル全体の気密保持に努めている。ケーブルバンド端部の補修は、既往調査結果<sup>3)</sup>に基づいて建設時に採用されていた2成分形変性シリコンよりも耐久性の高い2成分形シリコンの採用、シーリング材の余盛りの追加、プチルゴムの再充てんによる密実性の確保(図-5)を図りながら2005年から2019年にかけて行っており、現時点では管内吊橋全橋の補修が完了している(写真-2)。

なお、ケーブル塗膜割れ変状に関しては塗膜割れの一部から乾燥空気漏洩が確認されているが、補修はできていない。

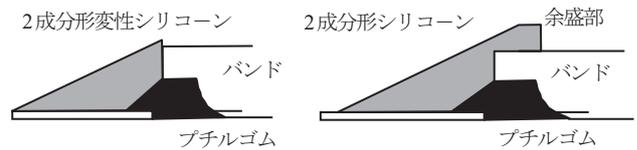


図-5 ケーブルバンド端部のシーリング補修  
(左:補修前, 右:補修後)

Fig.5 Sealing repair of cable band edge  
(Left: before repair, Right: after repair)

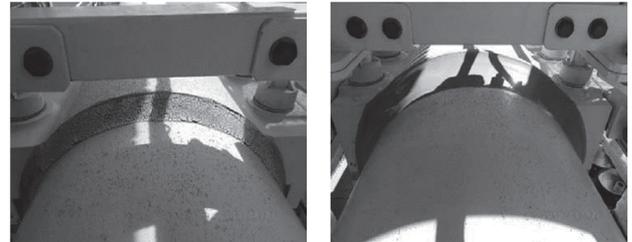


写真-2 ケーブルバンド状況(左:補修前, 右:補修後)  
Photo 2 Cable band (Left: before repair, Right: after repair)

## 3. ケーブル開放調査

### 3.1 調査箇所

高強度亜鉛めっき素線の状況確認を行うため、指針<sup>3)</sup>に基づき供用後20年が経過した2019年1月に2回目の来島海峡大橋のケーブル開放調査を実施した(図-6, 7)。調査箇所は、前回調査(2007年3月)と同じ来島海峡第一大橋・第三大橋の中央径間中央付近の北側(上り線側)ケーブルの排気カバー部である。なお、来島海峡第二大橋は、来島海峡第三大橋と同規模の橋梁であり、これまでの相対湿度のデータや定期点検の結果等からケーブル内の状況が第三大橋と同様であると考えられることからケーブル開放調査を行わなかった。

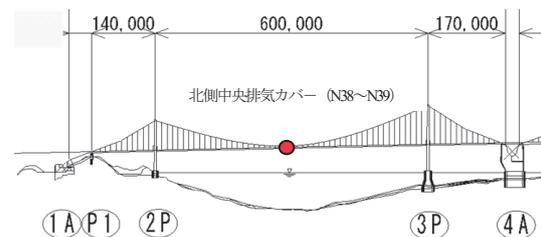


図-6 開放調査箇所(来島海峡第一大橋)

Fig.6 Location of survey (First Kurushima-Kaikyo Bridge)

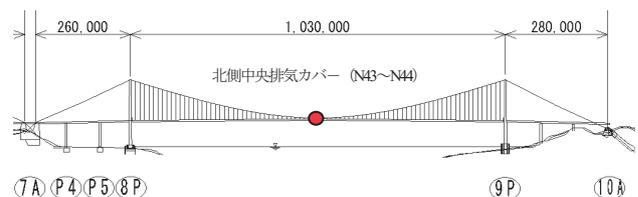


図-7 開放調査箇所(来島海峡第三大橋)

Fig.7 Location of survey (Third Kurushima-Kaikyo Bridge)

### 3.2 調査内容

表-1 に前回調査（2007年）と今回調査（2019年）項目の比較を示す。今回調査では、高強度亜鉛めっき素線の腐食状況を確認するための外層素線及び内層素線の外観目視調査（写真-3）に加えて残存亜鉛めっき厚さ計測、付着有害物質調査を実施した（表-2）。

外層素線及び内層素線調査の際は、排気カバーの取外しによるケーブル開放を行った。調査位置は、開放区間の全周方向 8 方位（45°間隔）とし（図-8）、内層素線はくさびで開口部を設けて深さ方向に 6~7 本程度の範囲を対象とした。

外観目視調査は素線状況を観察し、記録・写真撮影を行った。調査した結果については、指針<sup>3)</sup>の「ケーブル防食調査 ケーブル劣化評価判定基準写真」に基づき評価点 1~5 を付与（評価点が高いほど健全とみなす。）し、前回調査との比較を行った。

残存亜鉛めっき厚さ計測位置も外観目視調査と同じく全周方向 8 方位とし電磁膜厚計を用いて 1 方位（箇所）あたり 10 点のめっき厚を計測した。

付着有害物質調査位置は、全周方向 4 方位（90°間隔）とし、1 方位（箇所）20cm×20cm の範囲で純水で湿潤した脱脂綿で調査箇所の素線を拭き取り採取した付着物について、イオンクロマトグラフ分析を行い塩化物イオン・硫酸イオン量を計測した。

表-1 前回調査項目との比較

Table 1 Compare with the previous survey

部位	前回（2007年）	今回（2019年）
外層素線	外観目視調査（8方位45°間隔）	外観目視調査（8方位45°間隔）
		残存亜鉛めっき厚さ測定
		付着有害物質測定
内層素線	外観目視調査（4方位90°間隔）	外観目視調査（8方位45°間隔）

※前回調査（2007年）：外観目視調査のみ実施

表-2 今回調査項目と評価内容

Table 2 Survey items and evaluation contents

部位	項目	評価内容	試験方法等
外層素線	外観目視調査	腐食状況（白さび）	写真
	残存亜鉛めっき厚さ測定	残存亜鉛めっき量	電磁膜厚計測定
	付着有害物質測定	塩化物イオン、硫酸イオン	イオンクロマトグラフ分析
内層素線	外観目視調査	腐食状況（白さび）	写真、くさび打ち込み



写真-3 ケーブル開放状況

Photo 3 Opening main cable

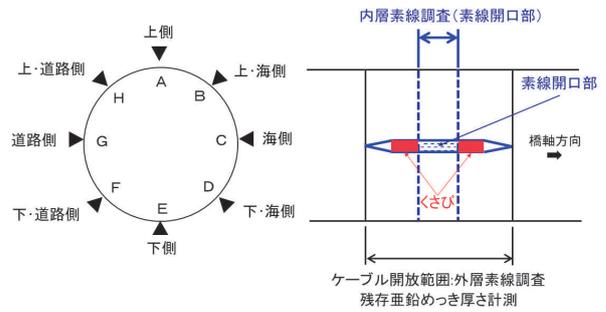


図-8 調査箇所

Fig.8 Location of survey

### 3.3 調査結果

#### (1) 外観目視

来島海峡第一大橋・第三大橋の外観目視調査結果を表-3 に示す。外層素線は前回調査（写真-4）と比べても全体的に評価点低下箇所はごくわずかで素線は健全であった。今回調査（写真-5）では、一部白さびが増えた範囲が確認されたがその程度は小さかった。また、内層素線は前回調査と比べて奥行方向に白さびの範囲の広がりが見られた（図-9, 10）が、白さびの程度は軽微であり、白さび以外の素線表面のめっき光沢は保たれている状態であった。

今回調査では、前回調査と変わらず評価点 4 または 5 と全体的に良好な状態を維持しており送気システムにおける除湿効果が機能していることを確認した。なお、前回調査の評価点より上昇している測点については、くさび位置が前回箇所と完全に一致していない等が原因であると考えられる。

また、排気カバー取外しには来島海峡第一大橋・第三大橋ともにケーブル素線表面は乾燥していることを確認している（開放調査 4 日前に 3mm/h, 4 時間の降雨）。

表-3 外層素線と内層素線の外観目視調査結果

Table 3 Condition of outside and inside cable wire

項目	来島海峡第一大橋		来島海峡第三大橋	
	前回調査 (2007年)	今回調査 (2019年)	前回調査 (2007年)	今回調査 (2019年)
外層素線	A	4	A	4
	B	5	B	5
	C	5	C	5
	D	5	D	5
	E	4	E	4
	F	5	F	5
	G	5	G	5
	H	5	H	5
内層素線	A	5	A	5
	B	-	B	5
	C	5	C	4
	D	-	D	5
	E	4	E	5
	F	-	F	5
	G	5	G	5
	H	-	H	5

■：前回評価点より上昇 ■：前回評価点より低下



写真-4 外層素線 (来島海峡第一大橋B測点 前回調査)  
Photo 4 Condition of outside cable wire  
(First Kurushima-Kaikyo Bridge station B previous survey)



写真-5 外層素線 (来島海峡第一大橋B測点 今回調査)  
Photo 5 Condition of outside cable wire  
(First Kurushima-Kaikyo Bridge station B this survey)

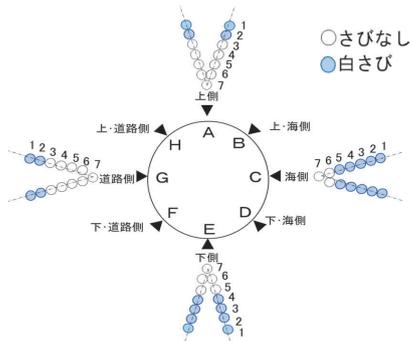


図-9 内層素線外観目調査結果 (来島海峡第三大橋)  
前回調査 (90° 間隔4方位)  
Fig.9 Condition of inside cable wire (Third Kurushima-Kaikyo Br.)  
Previous survey (90 degrees, 4 directions)

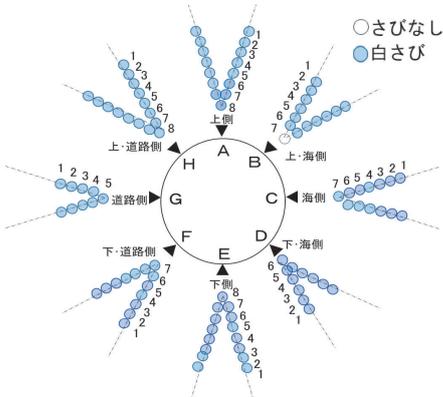


図-10 内層素線外観目調査結果 (来島海峡第三大橋)  
今回調査 (45° 間隔8方位)  
Fig.10 Condition of inside cable wire (Third Kurushima-Kaikyo Br.)  
This survey (45 degrees, 8 directions)

## (2) 残存亜鉛めっき厚さ

残存亜鉛めっき厚さの測定結果を図-11, 12に示す。来島海峡第一大橋は平均46~69 $\mu\text{m}$ , 来島海峡第三大橋は平均53~64 $\mu\text{m}$ であり, 設計値42 $\mu\text{m}$ 以上が確保されていた。来島海峡第一大橋海側のC測点のみ他に比べて低いが, その他の測点は設計値の1.4倍以上と十分な厚さを有していた。

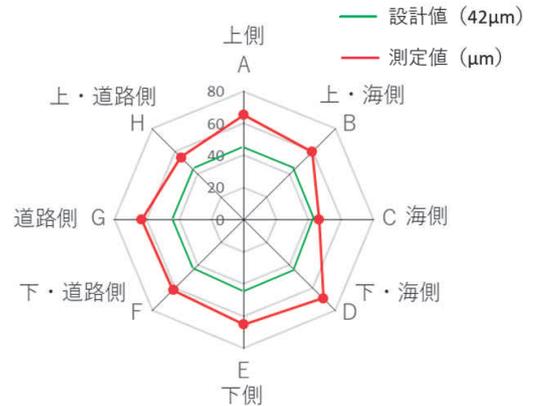


図-11 残存亜鉛めっき厚さ測定結果 (来島海峡第一大橋)  
Fig.11 Residual thickness of galvanization  
(First Kurushima-Kaikyo Bridge)

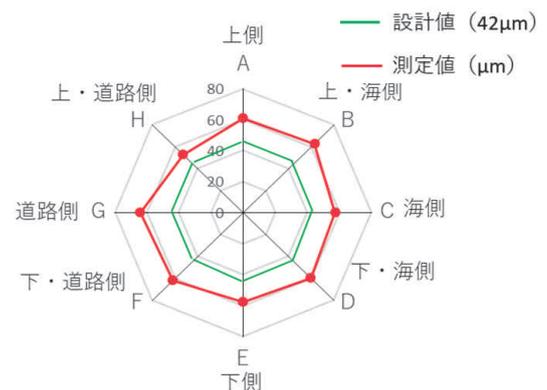


図-12 残存亜鉛めっき厚さ測定結果 (来島海峡第三大橋)  
Fig.12 Residual thickness of galvanization  
(Third Kurushima-Kaikyo Bridge)

## (3) 附着有害物質 (塩化物イオン, 硫酸イオン)

附着有害物質の測定結果を図-13, 14に示す。今回調査で最も数値が高かったのは, 塩化物イオン(Cl)は来島海峡第一大橋上側A測点の1.39 $\text{mg}/\text{m}^2$ , 硫酸イオン(SO<sub>4</sub>)は来島海峡第一大橋道路側G測点の3.53 $\text{mg}/\text{m}^2$ であった。2007年度の明石海峡大橋ケーブル開放調査での測定換算値はClは100~160 $\text{mg}/\text{m}^2$ , SO<sub>4</sub>は20~300 $\text{mg}/\text{m}^2$ であり, これと比較しても極めて微量であった。

これは, S字型ラッピングワイヤがワイヤ相互の噛み合わせ効果により雨水の浸入を防いだことやケーブルバンドが横割りバンドであり縦割りバンドに比べて雨水が浸入しづらい構造であったこと, 加えて架設位置における気象環境(風速, 風向)の違いによる飛来塩分量の差等によると考えられる。また, 2001年度から2002年度に実

施された腐食試験結果<sup>6)</sup>によれば、相対湿度40%RH一定の時、Cl<sup>-</sup>:100mg/m<sup>2</sup>、SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>:500mg/m<sup>2</sup>の条件下では腐食はほとんど進行しないとされており今後も腐食が進行する可能性は低いと考えられる。

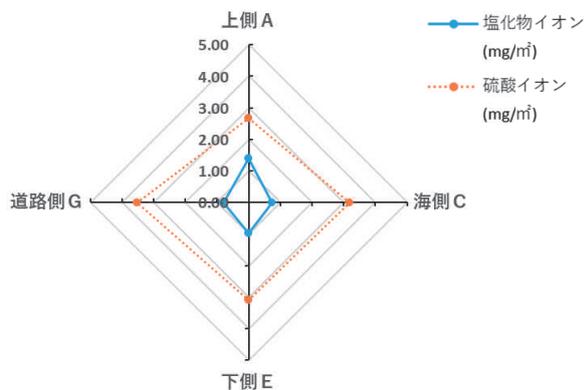


図-13 付着有害物質測定結果 (来島海峡第一大橋)

Fig.13 Measurement result of harmful substances (First Kurushima-Kaikyo Bridge)

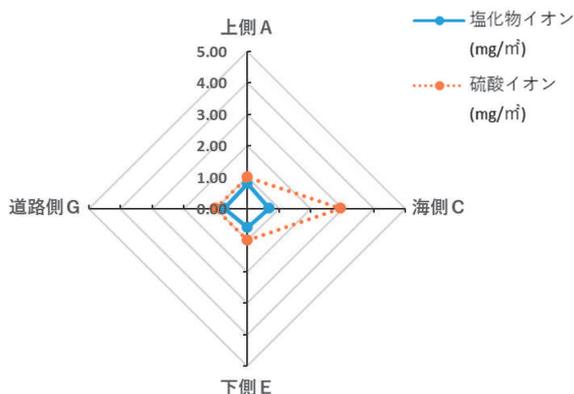


図-14 付着有害物質測定結果 (来島海峡第三大橋)

Fig.14 Measurement result of harmful substances (Third Kurushima-Kaikyo Bridge)

#### 4. 相対湿度の雨天連動状況の分析

ケーブル内湿度分析として1時間ごとにモニタリングしているケーブル内の相対湿度から測定結果を抽出し、雨天連動の有無について分析を行った。

来島海峡第一大橋、第三大橋の中央径間排気カバーの自動計測の年間湿度データと降雨データを図-15、16に示す。

来島海峡第一大橋の2018年3月から2019年12月の期間では、比較的頻繁に発生する10mm/h以下の降雨において相対湿度は20%RH以下、2018年7月の西日本豪雨においても管理基準値の相対湿度40%RHを上回る雨天連動は見られなかった。しかし、2020年1月以降に発生する降雨ではケーブル内湿度も上昇する傾向があり、相対湿度

40%RHを超え50%RH程度まで上昇しているケースも見られる。しかしながら、降雨から数日後には相対湿度20%RH以下となることが確認されている。また、現時点でケーブルバンドシール部からエア漏れや割れが確認されていないことから、経過観察とし、喫緊の補修の必要性はないと判断したが、今後雨天連動の原因究明が必要と考えている。

来島海峡第三大橋の2018年3月から2020年9月の期間では、10mm/h以下の降雨において相対湿度20%RH以下であり雨天連動は見られなかった。西日本豪雨の際には管理基準の相対湿度40%RHを超え50%RH程度まで上昇している。これはケーブルバンドのシーリング補修前であり、気密性の低下により大雨の影響を受け十分な除湿効果が発揮されなかったためと考えられる。その後シーリング補修完了以降では30mm/hを超える大雨時においても、相対湿度40%RH以下であることが確認できる。シーリング補修を行うことでケーブル内の気密化が図られ、乾燥空気の漏洩を抑えることにより、送気システムを有効に運用できたと考えられる。現時点でもケーブル内湿度は低い値を維持して安定しており、ケーブル塗膜の割れが雨天時に相対湿度を上昇させるような影響はないことが分かった。

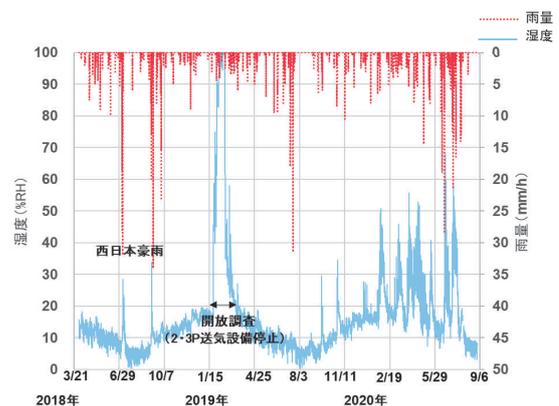


図-15 ケーブル内年間湿度と雨量 (来島海峡第一大橋)

Fig.15 Rainfall and humidity in the cable (First Kurushima-Kaikyo Bridge)

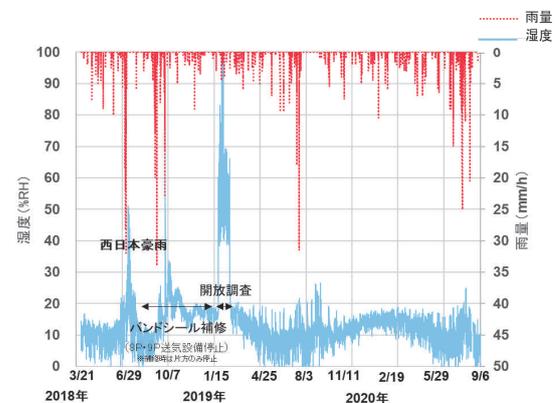


図-16 ケーブル内年間湿度と雨量 (来島海峡第三大橋)

Fig.16 Rainfall and humidity in the cable (Third Kurushima-Kaikyo Bridge)

## 5. おわりに

管内吊橋では、ケーブルバンド及び送気・排気カバーの合わせ部・端部等のシーリングの劣化やケーブル塗膜割れ等の変状が確認された。このうちケーブルバンド等のシーリング補修は全橋完了している。ケーブル塗膜割れ変状に関しては外層素線・内層素線の外観目視調査及び付着有害物質の測定等のケーブル開放調査を行い、ケーブル内湿度への雨天連動の影響の確認も踏まえ現況での補修の必要性を確認した。

その結果、10年前のケーブル開放調査と比較して外層素線・内層素線の白さびはほとんど進展しておらず、付着有害物質も極めて微量であった。また、2020年1月以降の来島海峡第一大橋において管理基準値の相対湿度40%RHを超える雨天連動が見られるが降雨から数日後には相対湿度40%RH以下になることが確認されており、現時点でもケーブルバンドシール部の変状は確認されていない。これらの調査結果から、現状では急激にケーブル素線の腐食が進展する可能性は低いと考えられる。そのため、ケーブル塗膜割れの早急な補修を行わなくても主ケーブルの状態に大きな影響はないと判断したが、雨天連動原因の確認については今後の検討課題である。

供用後20年が経過した来島海峡大橋の送気乾燥システム及びS字型ラッピングワイヤが十分機能しており主ケーブルは健全であることが確認された。今後の展望としては調査間隔を広げる等の合理化について検討していきたい。

### 参考文献

- 1) 貴志友基, 朝倉義博: 吊橋ケーブル送気乾燥システムの管理20年, 本四技報, Vol.42, No.130, PP.32-PP.37 2018.3
- 2) 北川信, 古家和彦, 中村俊一, 鈴木恵太: 吊橋ケーブル送気乾燥システムの防食性能に関する研究, 土木学会論文集, Vol.50, No.672, PP.145-PP.154, 2001.3
- 3) 本州四国連絡高速道路株式会社: 吊橋ケーブルの送気乾燥による防食システム設計・施工・維持管理指針(案), 2011.6
- 4) 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-PP.22, 2012.9
- 5) 田向和則, 横井芳輝, 朝倉義博: 来島海峡大橋ケーブル送気乾燥システムによる防さび対策の評価, 本四技報, Vol.33, No.112, PP.43-PP.48, 2009.3
- 6) 上村博文, 池田秀継: 吊橋ケーブル送気乾燥システムにおける腐食物質調査および改善等の検討, 本四技報, Vol.28, No.103, 2004.9

# 因島大橋ケーブル上段ハンドロープの張力再導入

Reintroducing of the top hand rope tension of the Innoshima Bridge cable

本郷 誠人

Masato Hongo

しまなみ尾道管理センター  
橋梁維持グループ

矢野 賢晃

Yoshiaki Yano

しまなみ尾道管理センター  
計画グループリーダー  
(前)しまなみ尾道管理センター  
橋梁維持課長

門田 整達

Yoshikatsu Kadota

しまなみ尾道管理センター  
橋梁維持グループサブリーダー

## 概要

因島大橋ケーブル上段ハンドロープにおいて、ケーブル作業車の繰返し荷重や経年に伴うリラクゼーションによる張力低下が見られた。ケーブル作業車載荷時の走行軌条としての性能を満足する張力を再導入することとし、中央径間と側径間それぞれについて最適な工法案の検討を行った。検討の結果、側径間は定着部をセットバックすることで、中央径間はハンドロープを中央で切り詰めることにより、張力の再導入を行った。本稿では、ハンドロープの張力再導入に至るまでの経緯、工法検討及び施工状況について報告する。

The tension of the upper hand rope of the Innoshima Bridge cable was reduced by the repeated load of the cable maintenance vehicle and relaxation with age. It was decided to reintroduce the tension that satisfies the performance as a running rail when the cable maintenance vehicle is loaded, and the optimum construction method was investigated for the central and side span. As a result, the tension was reintroduced by setting back the hand rope fittings of the anchorage abutment in the side span, and by trimming the top hand rope in the center of the center span. This paper reports on the background to the reintroduction of the hand rope tension, the construction method and the construction status.

## 1. はじめに

吊橋のメインケーブルには、維持管理用のハンドロープが設置されており、点検員によるケーブル点検時の手摺や、ケーブル作業車の走行軌条としての役割を果たしている。

因島大橋は、西瀬戸自動車道の向島と因島を結ぶ橋長1,270mの3径間補剛トラス吊橋であり、1983年に供用を開始した本州四国連絡橋で最初の吊橋である。因島大橋のハンドロープは、上中下段の計3段で構成され、ハンドロープ支柱により支持されている(写真-1)。上段ハンドロープ及び支柱は、ケーブル作業車の走行軌条及びケーブル点検時の手摺として使用されてきたが、2016年の点検時にハンドロープ支柱の変形や、ハンドロープの張力低下が確認された。

ケーブル作業車の走行軌条としての機能を回復するため、改良方法について検討を行い、上段ハンドロープについては、張力の再導入により対応することとし、2019年度に側径間を、2020年度に中央径間を対象にそれぞれ

工事を実施した。ハンドロープ支柱及びケーブル作業車についても、構造の変更により対応することとし、2020年度までに工事を完了している。

本稿では、ハンドロープの張力再導入に至るまでの経緯、工法検討及び施工状況について報告する。



写真-1 ハンドロープ (因島大橋)  
Photo 1 Hand rope (Innoshima Bridge)

## 2. 変状発生と張力再導入までの経緯

### 2.1 ハンドロープ概要

因島大橋のハンドロープは、上中下段の計3段で構成され、メインケーブルにヒンジ接続されたハンドロープ支柱により支持されている（表-1）。上段ハンドロープは、ケーブル作業車の走行軌条及びケーブル点検時の手摺として使用され、中下段ハンドロープは点検時の転落防止等のため設置されている（写真-2）。

表-1 ハンドロープ概要（因島大橋）  
Table 1 Outline of hand rope (Innoshima Bridge)

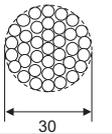
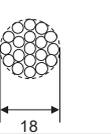
		上段ハンドロープ	中・下段ハンドロープ
種類		スパイラルロープ	スパイラルロープ
		1×37	1×19
構成			
ロープ径 (mm)		30	18
断面積 (mm <sup>2</sup> )		549	194
弾性係数 (kg/cm <sup>2</sup> )		1.6×10 <sup>6</sup>	1.6×10 <sup>6</sup>
ソケット 前面間 形状長	側径間 (m)	255.734	248.659
	中央径間 (m)	786.474	778.254
導入張力 (t)		13	3
最小切断荷重 (t)		74.1	27.1
標準重量 (kg/m)		4.4	1.58



写真-2 ケーブル作業車  
Photo 2 Cable maintenance vehicle

### 2.2 変状及び原因推定

2016年の点検時に、ハンドロープ支柱の変形（傾き及び最大125mmの曲がり）が確認された（写真-3）。変状数は、曲がり88箇所/254箇所及び傾き39箇所/254箇所であった。発見当時、ケーブル作業車を使用した補修工事が行われていたが、更なる変形の可能性があったため、ケーブル作業車の撤去を行った。

原因究明のため詳細調査を実施し、変状発生に至るまでの経緯として、以下が考えられた。

- 1) 1994年度のケーブル作業車新規製作に伴い、作業車の重量が約1,000kgの増となった（表-2）。
- 2) 経年によるハンドロープのリラクセーション及び重量増となったケーブル作業車の繰返し载荷により、作業車载荷時に上段ハンドロープのたわみが

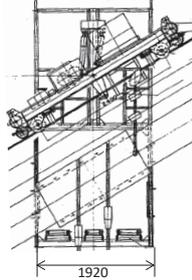
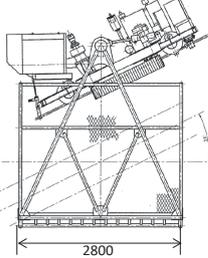
増大した。中段ハンドロープとケーブル作業車の干渉が発生したため、中段ハンドロープを1格点おきに下段まで引き下げることで、ケーブル作業車の走行を可能にした。

- 3) 中段ハンドロープを引き下げたことで、曲げモーメントの支点が下段ハンドロープ位置となった。ケーブル作業車の重量増によりハンドロープのたわみが大きくなり、ケーブル作業車の支柱乗越え時の負荷によって、クランプを押すことで変位が生じ、曲げ応力が降伏点を越えた結果、ハンドロープ支柱の変形に至った（図-1）。



写真-3 ハンドロープ支柱の変形  
Photo 2 Deformation of hand rope pillar

表-2 ケーブル作業車の変遷  
Table 2 Transition of cable maintenance vehicle

	供用当初	1994年度以降
一般図		
供用	1983年度	1994年度
走行方式	エンドレスウインチ巻取方式	クローラー方式
重量	2,313kg (自重1,613kg 積載荷重700kg)	3,300kg (自重2,863kg 積載荷重437kg)

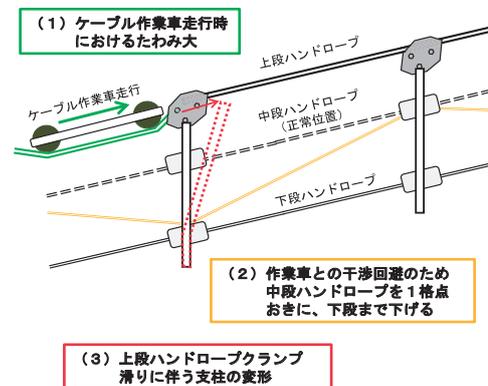


図-1 変形発生の推定メカニズム  
Fig. 1 Estimated mechanism of deformation

表-3 対応方針  
Table 3 Response policies

項目	変状	原因	対策方針
上段 ハンドロープ	・ハンドロープのたわみ増大	・経年によるリラクセーション ・重量増となったケーブル作業車の 繰返し荷重	ケーブル作業車走行軌条としての機能回復 ・ハンドロープの短尺化 ・ハンドロープ張力再導入
ケーブル 作業車	・中段ハンドロープとの干渉 ・支柱クランプ連結ボルトとの干渉	・上段ハンドロープのたわみ	クローラーシュー形状の改良 ・クローラーシュー幅短尺化による走行性改善 (中段ハンドロープとの干渉回避)
ハンドロープ 支柱	・ケーブル作業車の移動に伴う 支柱クランプの滑り ・ハンドロープ支柱の曲げ変形	・ケーブル作業車との干渉回避の ための中段ハンドロープの引き下げ	支柱に曲げ・変形を生じさせない 構造に改良 ・ハンドロープ支柱の改良 ・クランプの形状改良

### 2.3 対応方針

発生した変状に関する検討結果を踏まえ、対応方針の整理を行った(表-3)。

ケーブル作業車は、クローラーシューと中段ハンドロープ及びクランプ取付ボルトとの干渉を避けるため、2017年度にクローラーシューの幅を短尺化する改造を施した(写真-4)。

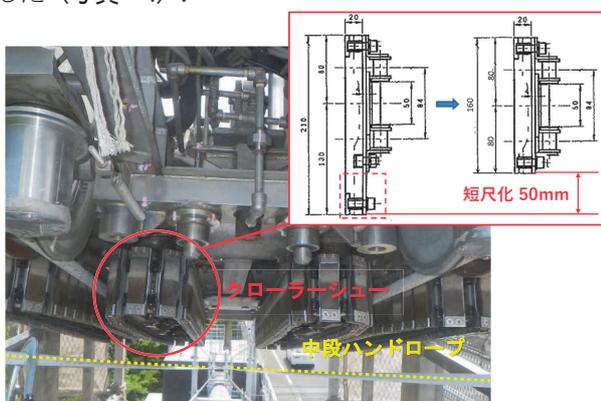


写真-4 ケーブル作業車改造  
Photo 4 Improvement of cable maintenance vehicle

ハンドロープ支柱については、支柱の断面積増により剛性を高めるとともに、中段ハンドロープの位置やクランプ形状についても改良を行い、2017~2018年度にかけて全数の交換を実施した(図-2)。

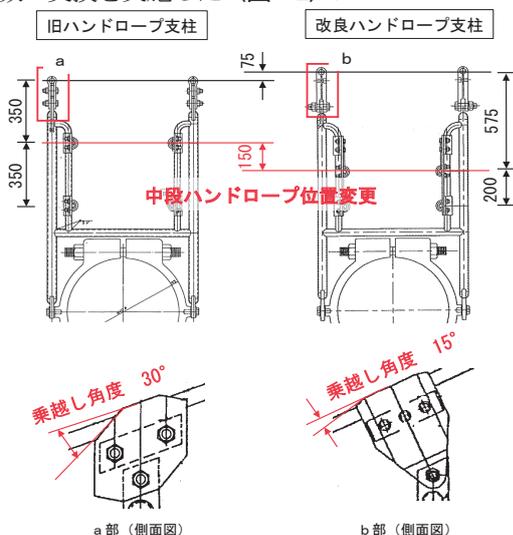


図-2 ハンドロープ支柱の改良  
Fig. 2 Improvement of hand rope pillar

上段ハンドロープについては、ケーブル作業車の走行軌条としての機能回復を図るため、張力再導入により対応することとした。詳細を次章以降に述べる。

## 3. 上段ハンドロープ張力再導入の工法検討

### 3.1 現状張力の把握

因島大橋の上段ハンドロープは、建設当初13tの張力が導入されていた(表-1)。各径間におけるハンドロープの現状張力を把握するため、スマートフォンの加速度計を利用し、固有振動数から張力を算出した結果、約10~13tonという結果であった(図-3)。

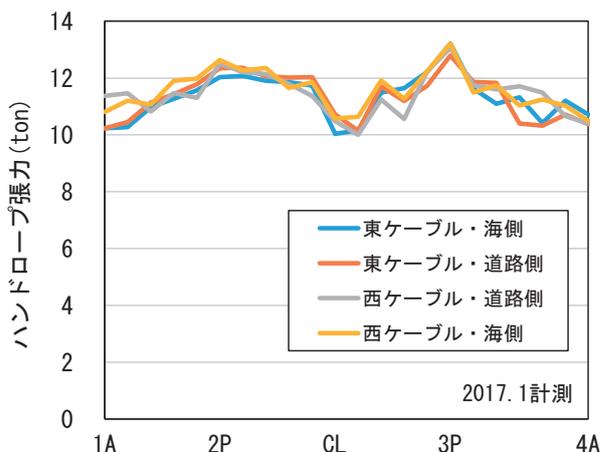


図-3 上段ハンドロープの張力  
Fig. 3 Top hand rope tension

### 3.2 ハンドロープ張力低下要因の推定

建設当時、ハンドロープは支柱に定着した後に、導入張力が13.0tとなるように無応力長を決定し、架設されている。今回のハンドロープの張力低下の原因として以下が考えられた。

- 橋体形状の変化に伴う影響
- ハンドロープのリラクセーション

このうち、a) については2015年度に実施した因島大橋の橋体精密点検において大きな変化が見られなかったことから、可能性は小さいものと考えられた。

b) について、曲げや引張りが繰返し作用する場合に、永久伸びの発生があるとされている。建設時から30年以

上経過した上段ハンドロープの伸びは0.025%程度とわずかであるが、ケーブル作業車の繰返し走行等の条件下で、リラクセーションが発生したものと推察された。

### 3.3 張力再導入量の検討

張力再導入にあたっては、「点検補修用作業車構造基準(案)」(本州四国連絡公団 平成17年11月)の解説にある「最大勾配が4%で作業車の走行に問題ない」の記載を適用することとし照査を行った結果、現況ハンドロープでも耐力上問題のないことを確認した。

なお、目視による現況ハンドロープの観察を行ったが、ハンドロープは比較的健全であり、腐食あるいは損傷のために取替えや、更新が必要となるような変状は見られなかった。

現況の上段ハンドロープ張力については、測定結果より側径間が10.5ton、中央径間が11.5tonであった。現状のケーブル作業車が上述の「最大勾配が4%で作業車の走行に問題ない」との記載を満足する張力を再導入するのに必要な引き込み長を算出した。その結果、中央径間は878mm(張力20.2ton)、側径間は319mm(張力20.8ton)となった(表-4)。

表-4 張力再導入量の検討結果

Table 4 Reintroduction quantity of top hand rope tension

		単位	建設時 ①	現状 ②	再導入 ③	仮引き量 ②-③
水平張力	側径間	ton	12.64	10.50	20.20	
	中央径間	ton	12.11	11.50	20.80	
見かけの無応力長	側径間	m		265.431	265.112	0.319
	中央径間	m		789.302	788.424	0.878

### 3.4 施工方法検討

上段ハンドロープの張力再導入方法について、中央径間及び側径間それぞれについて検討を行った。検討にあたっては、作業性、安全性及び工費について総合的に評価を行い、最適案を選定することとした(表-5)。

側径間は、塔頂側定着部あるいはアンカレイジ橋台付近で短尺化する案について検討を行ったが、いずれも工費が増大してしまうことから、アンカレイジ橋台の定着金をセットバックすることで、所定の張力を再導入する方法を採用することとした。

一方、中央径間については、塔頂側定着部あるいは中央径間中央において所定長短尺化することで張力を再導入する方法について検討を行ったが、塔付近での作業は資機材の搬入出時の施工性、安全性及び工費の面で劣ることから、中央径間中央でハンドロープを切断し、端部を加工した後に、ターンバックルで連結する方法が最も適しているとの判断に至った。

## 4. 現地施工

### 4.1 側径間の現地施工

側径間については、前述のとおりアンカレイジ橋台の定着金具をセットバックし、ハンドロープの定着部を移動させることで、所定の張力の再導入を行った(図-4)。

#### (1) 新規定着金具

新規に製作した定着金具を、既設定着金具から所定量セットバックさせ設置した。

#### (2) 支柱クランプ開放、鉛直方向拘束設備

張力再導入時、上段ハンドロープの浮き上がりが発生するため、支柱クランプを開放するとともに、過度な浮き上がり防止のための鉛直方向拘束設備を設置した(写真-5)。

表-5 上段ハンドロープ張力再導入方法

Table 5 Reintroduction method of top hand rope tension

	側径間			中央径間	
	案1	案2	案3	案1	案2
概要図					
主な作業場所	・塔頂(吊り足場) ・ケーブル上	・橋台上 ・桁上(橋台付近) ・ケーブル上	・橋台上 ・桁上(橋台周辺) ・ケーブル上	・塔頂(吊り足場) ・ケーブル上	・桁上(中央径間中央) ・ケーブル上
仮設備	・吊足場(塔頂サドル部) ・ゴンドラ ・仮引き用ジャッキ等	・単管足場(橋台前桁上弦材) ・ハンドロープ端部処理設備 ・仮引き用ジャッキ等	・単管足場(橋台前桁上弦材、橋台周辺) ・仮引き用ジャッキ等	・吊足場(塔頂サドル部、塔頂水平材) ・ゴンドラ ・仮引き用ジャッキ等	・単管足場(補剛桁上弦材部) ・ハンドロープ端部処理設備 ・仮引き用ジャッキ等
安全性	塔頂部の吊足場上で、海上及び路面上空での高所で狭い箇所での作業となり、安全性に劣る	橋台上、桁足場上及び路面上空での作業となり、作業スペースの余裕及び自由度が高い	橋台上、桁足場上及び路面上空での作業となり、作業スペースの余裕及び自由度が高い	塔頂部の吊足場上で、海上及び路面上空での高所で狭い箇所での作業となり、安全性に劣る	桁足場上及び路面上空での作業となり、海上部ではあるが作業スペースの余裕及び自由度が高い
工期	67日/径間	57日/径間	59日/径間	71日/径間	60日/径間
直接工事費	1.58	1.57	1.00	1.31	1.00
総合評価	○	○	◎ 採用	○	◎ 採用

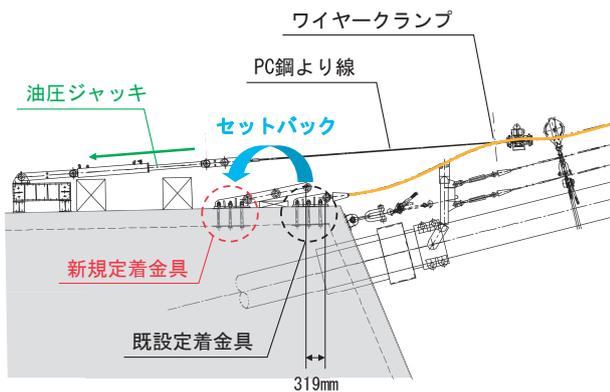


図-4 張力再導入（側径間）概要図

Fig.4 Schematic diagram of reintroduction of hand rope tension (side span)

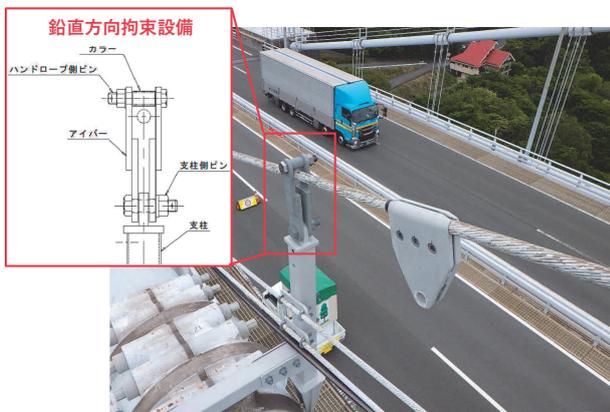


写真-5 支柱クランプ開放、鉛直方向拘束設備

Photo 5 Hand rope pillar clamp and vertical restraint equipment

(3) 引込設備

張力再導入時に必要となる油圧ジャッキ及び上段ハンドロープを掴むためのワイヤークランプを設置し、油圧ジャッキとワイヤークランプをPC鋼より線により連結した。

(4) 張力再導入

張力再導入は、アンカレイジ橋台上に設置した油圧ジャッキの操作により、既設定着金具のピンが取外し可能な位置まで引寄せた。既設定着金具のピンを取外した後、新規定着金具の位置まで上段ハンドロープを更に引寄せ、ピンにて定着を行うことで、側径間の上段ハンドロープの張力再導入を行った。

張力再導入時は、油圧ジャッキの圧力計により導入張力が許容切断荷重（安全率を考慮し25t）を上回ることを無いよう管理を行った。また、異常の有無を逐次確認するため、作業足場だけでなく主ケーブル上にも複数名人員を配置し、適宜状況を報告することで、安全面に細心の注意を払いながら施工を行った。

新規定着金具への定着を終えた後、ワイヤークランプや鉛直方向拘束設備に異常のないことを確認し、徐々に張力を開放、支柱クランプを復旧し、側径間の張力再導入を完了した（写真-6）。



写真-6 張力再導入（側径間）完了

Photo 6 After reintroduction of hand rope tension (side span)

4.2 中央径間の現地施工

中央径間については、上段ハンドロープを切断し、端部にエンドクランプを圧着加工した後にターンバックルで連結する方法を採用し、所定の長さを切り詰めることで張力再導入を行った（図-5）。

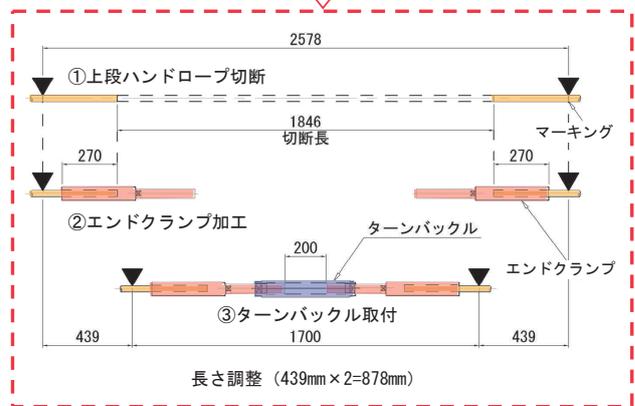
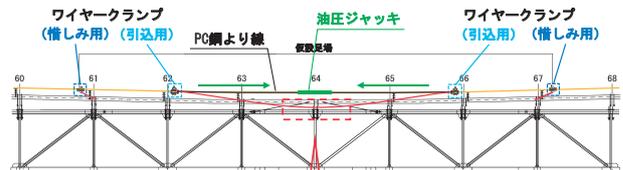


図-5 張力再導入（中央径間）概要図

Fig.5 Schematic diagram of reintroduction of hand rope tension (center span)

(1) 支柱クランプ開放、鉛直方向拘束設備  
側径間同様、上段ハンドロープの支柱クランプを開放するとともに、鉛直方向拘束設備を設置した。

(2) 引込設備  
中央径間については、張力再導入時に必要な油圧ジャッキを配置し、両端にPC鋼より線を取付けた後に、ワイヤークランプと連結した（写真-7）。また、引込用のワイヤークランプに加え、惜しみ用のワイヤークランプを設置することで、フェールセーフとした。

### (3) 端部加工設備

ハンドロープ端部は、押出機によりエンドクランプ加工を施し、ターンバックルで連結する構造とした。加工用押出機については、足場上に走行軌条桁を設置し、橋軸方向に移動可能な構造とすることで、作業性の向上を図った（写真-8）。

### (4) 張力再導入

中央径間については、ワイヤークランプ間の張力がゼロとなるよう油圧ジャッキを操作し、ハンドロープを所定の長さ切断した後、ハンドロープ先端がばらけないよう処理を施した。その後、押出機を用いて片方のエンドクランプ加工を行った（写真-9）。次いで、押出機を移動させ、もう一方の端部についてもエンドクランプ加工を施した。

切断したハンドロープ両端に取付けたエンドクランプ同士が、ターンバックルにより連結可能な長さまで、油圧ジャッキにより更に引込み、連結させることで、中央径間の上段ハンドロープの張力再導入を完了した（写真-10）。

## 5. おわりに

供用から40年近く経過した因島大橋における、上段ハンドロープの張力再導入について報告した。供用中の吊橋のハンドロープの張力再導入を行うという他に例のない試みであり、課題や制約の多い中での工事であったが、施工方法についても検討を行い、施工性及び経済性を考慮した工法の選定を行った。

現地における張力再導入時についても、適切な人員配置を行い、逐次状況の変化する中においても、細心の注意を払いながら施工を行った。2018年度までにケーブル作業車の改造及びハンドロープ支柱の改良を行い、2019年度に側径間、2020年度に中央径間の張力再導入を無事完了することができた。

2020年度には、張力再導入を終えた側径間においてケーブル作業車を用いた補修工事を実施しており、問題なく走行可能であることを確認している。

全径間の施工が完了し、ケーブル作業車の走行軌条としての機能を回復することができた。中央径間については維持管理を考慮し、切断箇所にマーキングを設置することで点検時に確認が行えるよう配慮している。定期的に点検を行い、ハンドロープの状況については確認を行うことが重要である。

今後も、お客様に安心・安全・快適に利用して頂けるよう、引続き適切な維持管理に努めていきたい。



写真-7 油圧ジャッキ（中央径間）  
Photo 7 Hydraulic jack (center span)



写真-8 エンドクランプ押出機及び走行軌条桁  
Photo 8 End clamp extruder and running rail



写真-9 エンドクランプ  
Photo 9 End clamp



写真-10 張力再導入（中央径間）完了  
Photo 10 After re-tension of hand rope (center span)

# ケーブル部材の状態が長大吊橋の 構造安全性に及ぼす影響に関する解析検討

Analytical study on the effect of the condition of cable members on the structural safety  
of a long-span suspension bridge

金田 崇男 Takao Kaneda

有馬 敬育 Noriyasu Arima

長大橋・技術部  
総括・耐震・耐風グループ  
サブリーダー

長大橋・技術部  
技術革新・アセットマネジメントグループ  
エキスパート

## 概要

橋梁、トンネルなどの道路構造物に対して、5年に1回、近接目視を基本とする定期点検が行われているが、道路橋に関しては、全部材の近接目視に要する人的・費用的な負担が大きいことや、近接目視では状態把握にならない場合があるなどの課題がある。特に、同じ機能を持つ部材数が多いうえに、近接目視が容易でない部材を有する吊構造形式橋梁では、その傾向は顕著であり、点検の最適化が求められている。

そこで、吊構造形式の長大吊橋を対象に、主ケーブル及びハンガーロープの状態が、橋の構造安全性に及ぼす影響を適切に評価する手法の検討を行った。本論文では、因島大橋を対象とし、解析モデル、ケーブル部材の状態、及び解析理論をパラメータとした解析的検討について報告する。

Regular inspections of road assets such as bridges and tunnels are carried out every five years through close visual inspection. However, there are some problems such as budget and personnel shortages for the close visual inspection for all the structural members of the highway bridges. Furthermore, the soundness and the progress of deterioration of the bridges are not completely grasped only by the close visual inspections. The trend can be seen particularly in cable supported bridges which are composed of many structural members of the same functions and the members that are not easy to see in close proximity, and the optimization of the periodic inspections is required.

Therefore, we have studied on an evaluation method to assess the structural soundness of the long-span cable supported bridges taking into account of the condition of the main cables and suspender ropes. In this paper, an analytical study for Innoshima Bridge focusing on the effects of the modeling of the entire bridge, the condition of cable members, and the analysis theory, is reported.

## 1. はじめに

平成 26 年より、道路の老朽化対策として、橋梁をはじめとする道路構造物を対象に、5年に1回の頻度で、近接目視を基本とする定期点検が行われている<sup>1)</sup>。道路橋については、全部材を一律に近接目視するために必要な人的・費用的な負担が大きいこと、近接目視では状態の把握にならない場合があることなどの課題がある。これらの課題に対し、道路メンテナンスに関する今後の検討事項として、橋梁等の構造や点検の目的に応じて、点検を最適化していくことが求められている<sup>2)</sup>。

特に、特殊橋である吊構造形式橋梁については、橋ごとに構造特性や、各部材に期待する役割が異なることや、同じ機能を持つ部材を多く有するとともに、近接目視が困難又は容易でない部材を有することなどから、点検の

最適化の有意性が顕著である。

さらに、近年、海外においてケーブル部材の破断による橋梁の落橋事故<sup>例えば、3)</sup>も発生していることから、吊構造形式橋梁の点検の最適化、すなわち合理化及び信頼性向上を図ることが、今後の維持管理において重要である。

ここで、道路橋定期点検要領<sup>4)</sup>では、橋の健全性の診断は、道路橋の機能に支障が生じているか否かという観点で判定することとされており、そのために行う状態の把握については、「健全性の診断の根拠となる状態の把握は、近接目視により行うことを基本とする」とされている。また、本要領の法令運用上の留意事項において、「定期点検を行う者は、健全性の診断の根拠となる道路橋の現在の状態を、近接目視により把握するか、または、自らの近接目視によるときと同等の健全性の診断を行うことができる情報が得られると判断した方法により把握

しなければならない。」とされている。

さらに、道路橋の健全性の診断にあたっては、部材等の変状が道路橋全体の健全性に及ぼす影響は、構造特性、変状の原因並びに変状の進行性、架橋条件などによっても異なることから、健全性の診断に必要な情報は橋ごとに異なることとなる。

そこで、橋の構造特性に応じて、橋を構成する部材等の状態が、橋の機能に影響を及ぼすかを明らかにすることができれば、点検の最適化につながると考えられる。すなわち、部材等の重要度や橋の機能への寄与度などを評価することができれば、ケーブル部材のうち、同じ機能を持つ複数の部材に対して点検の合理化の可能性を検討することができると考えられる。

このような観点で行われた研究として、道路橋におけるリダンダンシーに関する検討<sup>4)</sup>があるが、ケーブル部材に着目した検討事例はわずかである。

ケーブル部材の状態変化については、腐食等による破断、クリープなどがある。これらの状態変化に関する検討のうち、設計上、地震時に破断を想定しているセンターステイに関する検討<sup>5)</sup>、中小規模の無補剛吊橋の変状を解析で再現し、応力状態や振動特性などの変化状況を明らかにした、ケーブルのクリープの影響を考慮した解析的研究<sup>6)</sup>等がある。また、設計上、破断を想定していないケーブル部材の破断に関する主な検討事例については、以下がある。

吊橋に関しては、異常時における吊橋の健全度を判定する健全度診断システムの構築のために、南備讃瀬戸大橋を対象に行われたハンガーロープ及び補剛桁部材の破断検討<sup>7)</sup>や、ハンガーロープ取替時の影響検討<sup>8)</sup>などがある。ただし、いずれも弾性モデルを用いた解析しか行われておらず、破断などのケーブル部材の状態変化が橋の機能に及ぼす影響評価に関する検討としては十分でないと考えられる。

一方、斜張橋の斜ケーブルの腐食劣化を考慮した残存性能に関する解析検討<sup>10)</sup>は、桁及び塔をファイバー要素としてモデル化した解析による斜ケーブルの断面減少と橋の残存耐荷力等の関係を示した検討である。ただし、ケーブル部材が橋に及ぼす影響評価の一例で、ケーブル

部材の状態が橋の機能に及ぼす影響評価のための検討手法という観点で行われた事例はない。

そこで、橋を構成する部材等の状態が、橋の機能に及ぼす影響評価のため、その解析手法に関する検討を行う。

本稿では、吊橋形式の長大吊橋を対象に、点検の最適化に資する資料作成を目的とし、主ケーブル及びハンガーロープの状態が橋の構造安全性に及ぼす影響を評価できる手法を見出すため、解析モデル、ケーブル部材の状態、解析理論等をパラメータとした構造解析を行い、解析のモデル化や理論の違いが橋の応答アウトプットに及ぼす影響について考察する。

## 2. 検討概要

ハンガーロープの破断や主ケーブルの断面減少など、吊橋のケーブル部材の状態の変化を考慮できる解析手法を検討するため、表-1に示す因島大橋を対象に、表-2に示す簡易モデル(図-1)及び詳細モデル(図-2)の2種類の解析モデルを作成した。そのうえで、解析モデル、ケーブル部材の状態、解析理論(微小変位解析及び有限変位解析)の違いが、橋の応答アウトプットに及ぼす影響を評価するため、補剛桁等の応答値を算出する。

### 2.1 橋梁概要

因島大橋は、中央径間 770m、側径間 250m、橋長 1270m の 3 径間 2 ヒンジ補剛トラス桁吊橋である。以下で、主要な部材の設計概要を文献(11)に基づき概説する。

#### (1) ケーブル

主ケーブルは、直径 618mm で、補剛桁に沿い 26m 間隔で左右それぞれ 1 本ずつ架設されている。各ケーブルは、直径 5.17mm 亜鉛メッキ鋼線 127 本からなるケーブルストランド 91 本を束ねた平行線ケーブルである。主ケーブルには、約 10m 間隔でケーブルバンドが取り付けられており、各ケーブルバンドに鞍掛けされた直径 54mm の 2 本のハンガーロープが補剛桁を支持している。スパン中央には、センターステイロープが取り付けられており、補剛桁の風や地震による変位を拘束している。

表-1 橋梁諸元

Table 1 Outline of Innoshima Bridge

橋名	因島大橋
形式	3径間2ヒンジ補剛トラス桁吊橋
橋長	1,270m
支間割	250m+770m+250m
主塔	塔高136m
床版形式	鋼床版
主ケーブル	2本, 618mm(P.W.S. 127×91本)
ハンガーロープ	968本 (121格点×4本×2面)

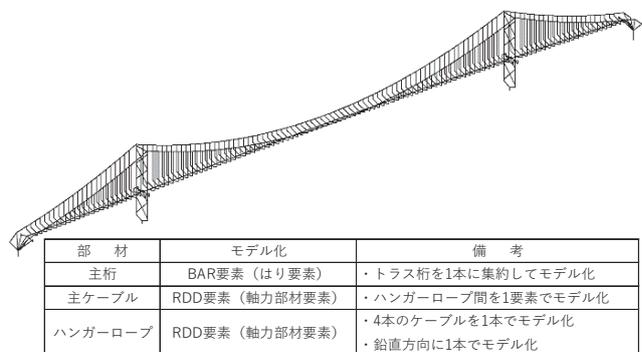


図-1 簡易モデル

Fig. 1 Simple analysis model

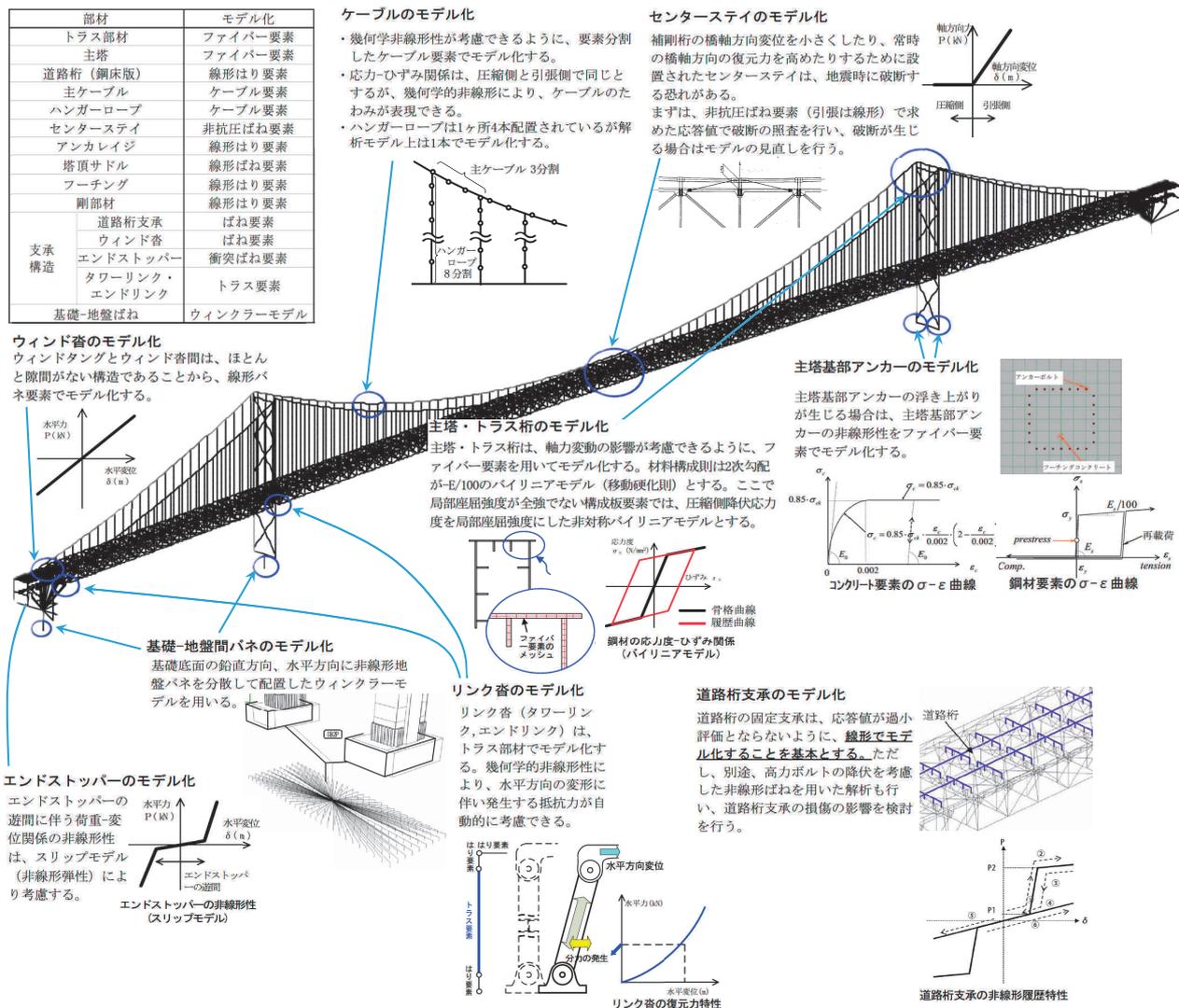


図-2 詳細モデル

Fig.2 Detailed analysis model

(2) 補剛桁

補剛桁は、自動車等の鉛直荷重、風等の水平荷重を直接支えるもので、鋼床版を主体とする床組、主構、主横トラス、横構で構成されている。補剛桁の重量の大半はハンガーロープを経て主ケーブルに伝達される。

補剛桁の両端には、鉛直荷重を塔に伝えるタワーリンク及びアンカレイジに伝えるエンドリンク (以下「リンク沓」という。) と、橋軸直角方向の水平荷重を塔又はアンカレイジに伝えるウィンド沓がある。リンク沓は鉛直方向の移動を拘束し、橋軸方向の移動と鉛直方向の回転は自由である。ウィンド沓は橋軸直角方向の移動を拘束し、橋軸方向の移動と水平方向の回転は自由である。

(3) 主塔

ケーブルを支える塔本体は海面上約 145m の高さの 2本の塔柱と斜材、水平材からなるトラス形式であり、主ケーブルの荷重は塔頂サドルから塔柱を経て基礎に伝達される。2本の塔柱をつなぐ斜材と水平材は主に風等の

橋軸直角方向の荷重に抵抗するためのものである。

(4) アンカレイジ

直接基礎であるアンカレイジは、主ケーブルを定着するものであり、アンカーフレームとコンクリートブロックに大別される。アンカーフレームは、ケーブル張力をコンクリートブロックに伝えるもので、ストランドケーブルを定着部の先端で直接受け、ストランドに合わせ放射状に配列された引張材に荷重を伝えている。

(5) 主塔基礎

主塔基礎は、塔から伝達される荷重を支持するもので、アンカレイジ同様、直接基礎である。

3. 解析モデル

ハンガーロープの破断など、ケーブル部材の状態変化による橋の応答値を算出する構造解析を行うため、部材

の塑性化の影響、ケーブル部材の破断の影響の有無を確認するため、全体系モデルとして、3.1に示す簡易モデル及び詳細モデルを用いることとした。なお、ケーブル部材のモデル化については、3.2で概説する。

### 3.1 全体系のモデル化

#### (1) 簡易モデル

簡易モデルは、補剛桁を1本の線形はり要素でモデル化した魚骨モデルとした<sup>12)</sup>(図-1)。リンク沓等は、詳細モデルと同様のモデル化を行った。

#### (2) 詳細モデル

詳細モデルは、耐震性能照査業務<sup>13)</sup>で作成した3次元骨組みモデルを準用し、ケーブル部材の状態変化後の塑性化を評価できるように、主塔及びトラス桁部を非線形ファイバー要素でモデル化した。各部材のモデル化については、図-2に示すとおりである。

#### (3) 解析モデルの妥当性確認

解析モデルの妥当性確認については、主ケーブル及びハンガーロープの張力に着目して行った。なお、魚骨モデルに死荷重を載荷した場合、建設当時の設計計算書に記載された死荷重時の主ケーブル及びハンガーロープの張力を再現できなかったため、ハンガーロープにプレストレスを与えつつ張力を調整した。張力調整は、後述の有限変位解析に対して行い、微小変位解析では有限変位解析で収束した値を準用した。

表-2 解析モデル  
Table.2 Analysis Models

項目	簡易モデル	詳細モデル	
プログラム名	Sean-FEM		
解析モデル	3次元骨組みモデル		
モデル化	主ケーブル	線形ケーブル要素	線形ケーブル要素
	ハンガーロープ	非線形トラス要素	線形ケーブル要素
	トラス桁	線形はり要素 (1本棒でモデル化)	非線形ファイバー要素
	道路桁	線形はり要素	線形はり要素
	塔	線形はり要素	非線形ファイバー要素
	塔頂サドル	線形ばね要素	線形ばね要素
	センターステイ	—	非抗圧ばね要素
	アンカレイジ	剛体要素	線形はり要素
	フーチング	剛体要素	剛体要素
	剛部材	剛体要素	剛体要素
	道路桁支承	—	線形ばね要素
	ウィンド沓	線形ばね要素	非線形ばね要素
	エンドストップ	—	衝突ばね要素
	リンク沓	トラス要素	トラス要素
基礎・地盤ばね	S-Rばね(剛)	S-Rばね(剛)	

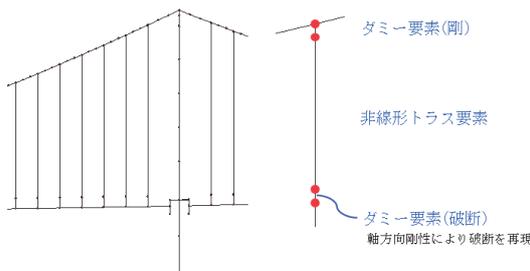


図-4 簡易モデルにおけるハンガーロープのモデル化  
Fig. 4 Modelling of suspender rope (simple model)

### 3.2 ケーブル部材のモデル化

#### (1) ケーブル部材の諸元

主ケーブル及びハンガーロープは、いずれも最小引張強さ 1570N/mm<sup>2</sup>の亜鉛めっき鋼線を用いている。これは、H29 道示<sup>14)</sup>II編に規定される平行線ストランド及び被覆平行線ストランド用亜鉛めっき鋼線の ST1570 と同等の性能を有していることから、以下で非線形性を考慮した簡易モデルのハンガーロープの応力度-ひずみ関係を図-3のように設定した。

#### (2) ハンガーロープのモデル化

##### (a) 簡易モデル

トラス要素でモデル化し、圧縮に抵抗しない非抗圧性、引張には降伏後に剛性低下し2次剛性となるような非線形性を考慮した。また、ハンガーロープの破断を表現するため、部材の上下に破断を考慮できるダミー要素を含む3要素を有する1本モデルとした(図-4)。

##### (b) 詳細モデル

細分割した線形ケーブル要素とした(図-5)。本来は非抗圧で引張降伏に対する塑性化等の材料非線形性を有する部材だが、詳細モデルが複雑なため、材料非線形性を考慮したモデルでは、解析が収束しなかったためである。

#### (3) 主ケーブルのモデル化

##### (a) 簡易モデル

サグの影響を考慮できるように、ハンガーロープ間を3分割した線形ケーブル要素とした。なお、主ケーブルの材料非線形性は、本検討では考慮しないこととした。

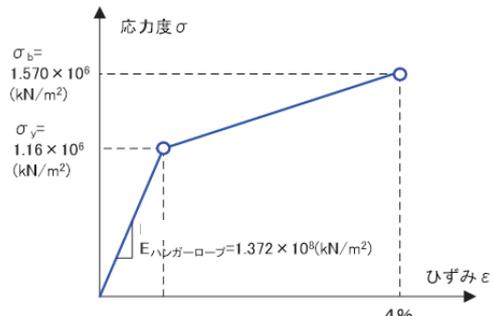


図-3 ハンガーロープの非線形性  
Fig. 3 Nonlinearity of suspender rope

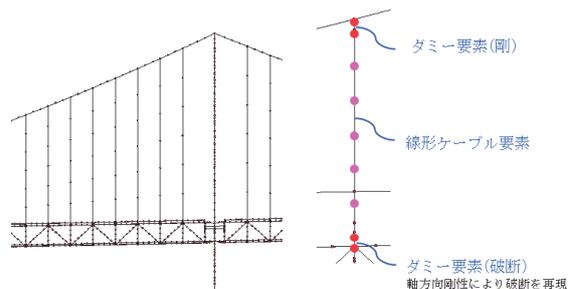


図-5 詳細モデルにおけるハンガーロープのモデル化  
Fig. 5 Modelling of suspender rope (detailed model)

### (b) 詳細モデル

簡易モデルと同様、線形ケーブル要素とした。本来、ハンガーロープ同様、圧縮力に対する非抗圧性及び引張降伏に対する塑性化などの材料非線形性を有する部材であり、引張の非線形性を考慮するためにはケーブル要素でなくトラス要素とする必要があるが、ハンガーロープ間を再分割することにより、面外方向への拘束がない中間点が生じ、トラス要素では不安定となること、そして、構造解析の結果、ハンガーロープの破断に着目したケースでは、主ケーブルの応答は鈍感であり、引張降伏するような応答は生じないためである。

### 3.3 ケーブル部材の状態

#### (1) ハンガーロープ

ハンガーロープの状態は、表-3に示す3ケースで表現した。維持管理で想定される状態としては、腐食による断面減少や破断があるが、ハンガーロープが橋の構造安全性に及ぼす影響を把握する観点から、部材自体をなくした状態、すなわち破断した状態に着目した。

ハンガーロープの破断影響は、衝撃力の有無も考慮する必要があると考えられるが、ここでは、ハンガーロープ除去後の釣り合い状態を収束計算したもの（ケース1）、逆方向に張力Tを載荷したもの（ケース2）、逆方向に2倍の張力2Tを載荷したもの（ケース3）とした。

#### (2) 主ケーブル

主ケーブルは吊橋における最重要部材であることから、破断のみならず、腐食による断面減少も避けるべき状態であるが、中小吊橋において、主ケーブルの断面減少が生じている事例がある<sup>19)</sup>。そこで、主ケーブルの状態として、腐食等による断面減少に着目することとした。

## 4. 構造解析

解析には、ハンガーロープ破断後の断面力の再分配を考慮できる「Scan FEM」を用いた。そのうえで、ハンガーロープの破断、主ケーブルの断面減少というケーブル部材の状態変化が、橋の挙動に及ぼす影響を検討するための構造解析を行った。

### 4.1 載荷荷重

載荷荷重は、死荷重 D+活荷重 L とし、活荷重は、H29 道示<sup>14)</sup> I 編に規定される B 活荷重とした。各ケーブルに着目した影響線は、簡易モデルを用いて求めた。解析モデルは、アンカレイジ部分のモデル化以外は橋軸方向、橋軸直角方向に对称のモデルであることから、影響線は、A1～中央径間中央までの間の、L 側（起点から見たときの左側）のケーブルに着目して算出した。

### 4.2 着目ケーブルの決定

#### (1) ハンガーロープの単数破断

詳細モデルを用いた単数破断ケースにおける死荷重時のハンガーロープ張力は、どのハンガーロープも同程度であったが、活荷重時の張力には以下の傾向があった。

- ・アンカレイジ近傍の張力が最大となる
- ・主塔近傍の張力は比較的小さい
- ・上記の位置以外の張力は概ね同程度

以上より、着目ハンガーロープは、張力の大小、位置の違い、影響線の形状の違いに考慮し、表-4 に示す No.742, No.766, No.786 の3カ所とした。

#### (2) ハンガーロープの複数破断

単数破断では、橋の構造安全性への影響がわずかであると考えられた。そこで、部材が塑性化する状態を再現するため、桁のねじれや橋軸直角方向への断面力の変化が大きいケースを想定して、側径間の No.742 に着目し、橋軸方向に片側 5 本が破断するケースとした（図-6）。

#### (3) 主ケーブルの断面減少

主ケーブルの断面減少のケースについても、主要断面における主ケーブル張力の影響線を求めて、着目断面を決定した。桁端部以外はほぼ同等であったことから、主塔近傍の格点 21～22 間の位置とした（図-6）。

断面積の低減については、起点側から終点側を見た時の左側（L 側）全域の主ケーブル断面で考慮した。これは、いずれか一断面において断面欠損していた場合、その影響はどの程度の範囲までかが不明であることから、安全側に評価したためである。

表-3 ハンガーロープの状態

Table 3 Assumed condition of suspender rope

No	着目ハンガーロープの状態	解析方法	備考
1	破断（除去）	釣り合い状態を収束計算	破断等でハンガーロープがなくなった状態を厳密に再現
2	破断（除去）	逆方向に張力（T）を載荷	破断等でハンガーロープがなくなった状態を簡易に再現
3	破断（除去）	逆方向に張力の2倍（2T）を載荷	破断した衝撃影響を簡易に再現

表-4 ハンガーロープの単数破断ケース

Table 4 Assumed suspender rope break

	ケーブル位置	着目点	部材番号	格点番号
1	側径間の支間中央～主塔位置	側径間の長ケーブルに着目	742	17
2	中央径間主塔～支間中央	中央径間の平均長のケーブルに着目	766	41
3	中央径間中央	中央径間側の短ケーブル部に着目	786	61

### 4.3 ハンガーロープの破断

表-5に示す単数破断の3ケース、複数破断の1ケースに対して、吊橋を構造安全性への影響を考慮するため、主要な部材である主ケーブル、ハンガーロープ、補剛桁、主塔の応答に着目し、解析結果を概説する。

#### (1)ハンガーロープの単数破断

単数破断は、破断位置による大きな違いはなかったため、No.742のハンガーロープ破断時について整理する。

#### (a)主ケーブルの張力

ハンガーロープの単数破断は、破断ハンガーロープ位置の主ケーブル張力に、ほとんど影響を及ぼさなかった(図-7)。また、解析モデル、解析理論の違いで差は生じなかった。

#### (b)ハンガーロープの張力

簡易モデルにおける有限変位解析結果と、ハンガーロープの降伏張力及び破断張力を図-8に示す。ハンガーロープの張力は、破断させた No.742 の周辺でしか変化していない。この傾向は、主ケーブルと同様、解析モデル、解析理論の違いでも差はなかった。なお、ハンガーロープの張力は、ハンガーロープの降伏張力や破断張力に対し十分余裕を有している。

図-9は、No.742の前後2本ずつと、その同一格点反対側のR側(図-9の三角印)の計10本分について、D+Lに対する破断後の応答値の比率を示す。解析ケースは、簡易モデルにおける微小変位解析結果及び有限変位解析結果と、詳細モデルにおける有限変位解析結果である。破断ハンガーロープと同じL側(図-9の丸印)の隣接ハンガーロープ(No.741, 743)は、張力が大きくなる。ただし、この傾向は、解析理論の違いで差が生

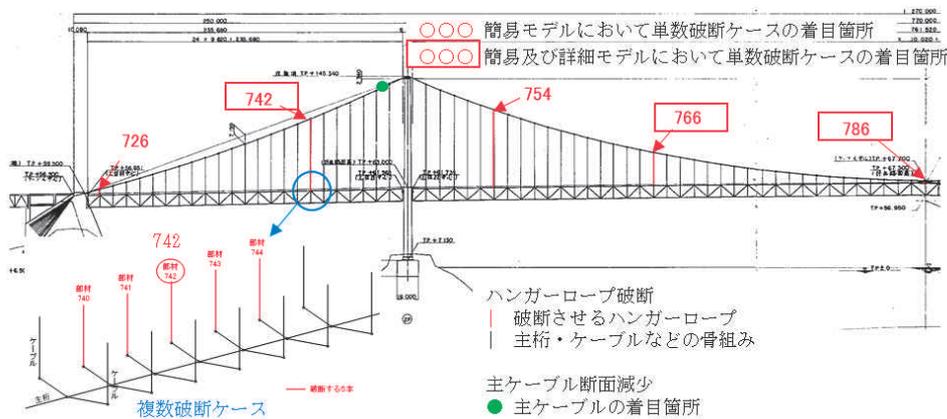


図-6 ハンガーロープ破断及び主ケーブル断面減少の検討ケース

Fig. 6 Assumed suspender rope break and decrease in cross-section of main cable

表-5 ハンガーロープ破断の解析ケース

Table 5 Analysis case of suspender rope breaks

破断ケース	解析モデル	破断ケーブル	载荷荷重	幾何学的非線形の有無
単数	簡易	3ケース (742, 766, 786)	D, D+L	微小変位
	詳細	3ケース (742, 766, 786)		有限変位
複数	簡易	1ケース		微小変位
	詳細	1ケース		有限変位

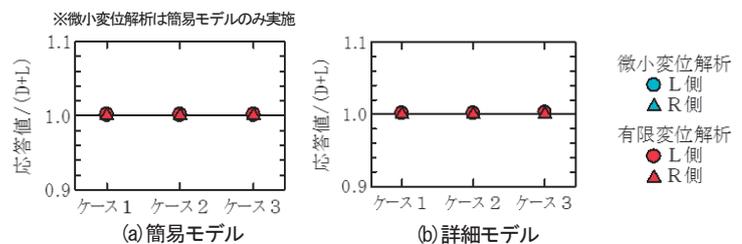


図-7 主ケーブルの張力の比率 (No. 742 破断時)

Fig. 7 Ratio of main cable tension (Cable number 742 breaks)

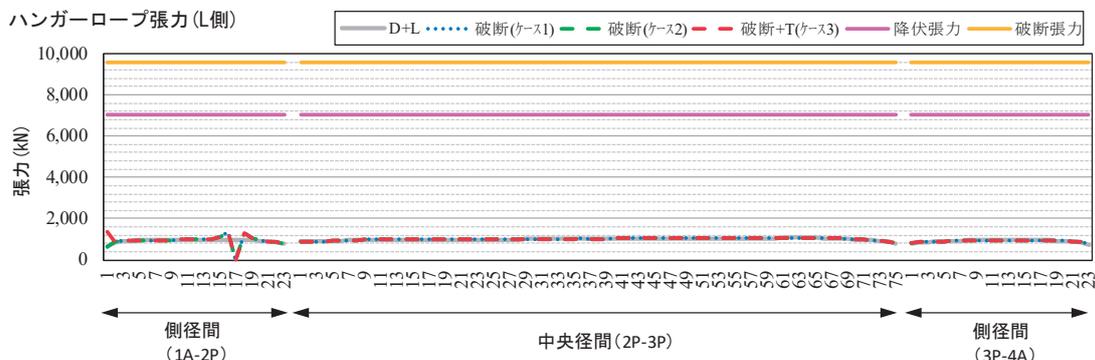


図-8 ハンガーロープの張力 (簡易モデル, 有限変位解析, No. 742 破断時)

Fig. 8 Suspender rope tension (simple model, finite displacement analysis, cable number 742 breaks)

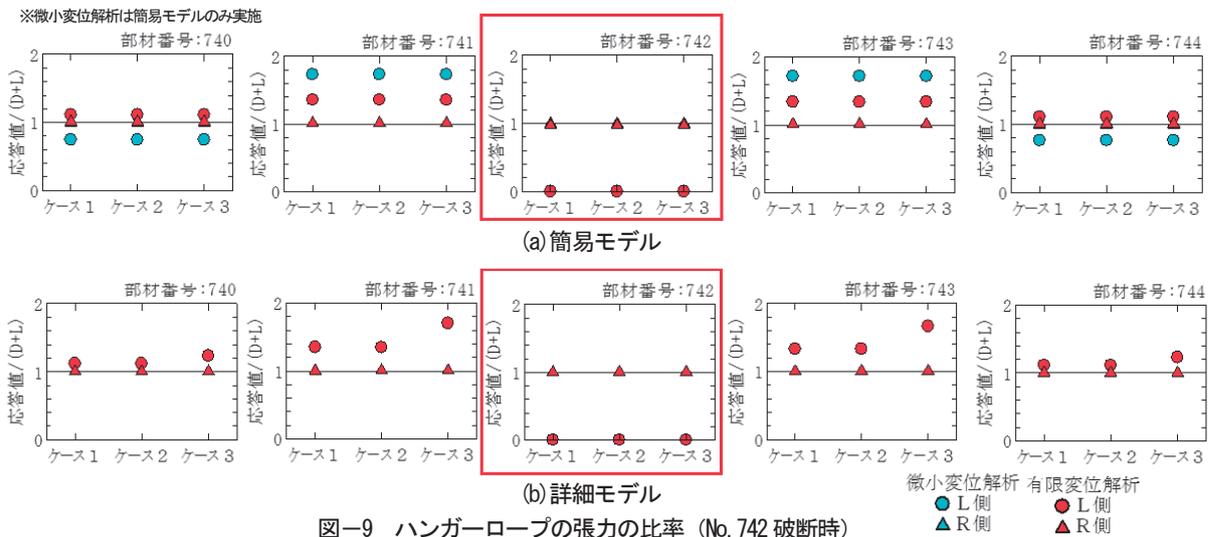


図-9 ハンガーロープの張力の比率 (No. 742 破断時)

Fig.9 Ratio of suspender rope tension (Cable number 742 breaks)

じており、簡易モデルでは微小変位解析の方が有限変位解析より応答の変化が大きい。

次に、破断ハンガーロープの2本隣 (No.740, 744) では、簡易モデルで解析理論の違いで傾向に差が生じた。微小変位解析では、ハンガーロープの張力が小さくなる側に变化したのに対して、有限変位解析ではハンガーロープの張力が大きくなる側に变化した。また、その程度は微小変位解析の方が大きい。

また、どの同一格点反対のR側でも、ハンガーロープの張力の変化はほぼなく、ハンガーロープが単数破断した場合は桁の回転は生じていないものと考えられる。

最後に、表-3のハンガーロープの状態による違いは、簡易モデルでは見られないものの、詳細モデルではハンガーロープの状態がケース3の場合では、発生張力が大きくなる傾向がある。

### (c) 補剛桁の変位

図-10は、側径間(1A~2P)、中央径間中央、破断位置(No.742)における、D+Lに対するNo.742破断後の補剛桁の応答変位の比率を示す。解析ケースは、図-9と同様である。

鉛直方向変位は、全体的な分布は同じで破断により鉛直変位はほとんど変化していないが、簡易モデルでは有限変位解析よりも微小変位解析の方が変位が大きくなる傾向がある。これは、有限変位解析の方が補剛桁の変形の方に応じてその変形に抵抗するように張力が変動することで、補剛桁の変位が抑制されるためと考えられる。橋全体の鉛直変位を示す図-11からも同様の傾向が確認できる。

橋軸方向変位は、全体的に微小変位解析の方が有限変位解析よりも大きくなる傾向が見られた。これは、補剛桁の橋軸方向の拘束をリンク沓で行っているためと考えられる。リンク沓は橋軸方向の変位に応じて橋軸方向の抵抗が増加する機構であり、初期状態は橋軸方向の抵抗

は有していない。よって、変位に応じた抵抗の増加を考慮できない微小変位解析では、橋軸方向に大きな変位が生じたものと考えられる。なお、有限変位解析ではハンガーロープの状態ケース3において若干の変化が生じているが、有意な差はなかった。また、ハンガーロープの状態で傾向に違いが生じた。簡易モデルでは、微小変位解析はケース1~3で比率の変化はなかったが、有限変位解析では、側径間中央と破断位置でケース3のL側で比率が小さくなった。

橋軸直角方向変位は、中央径間中央で変位の発生方向が異なるが、変位量のオーダーは概ね同程度であり、解析モデル、解析理論の違いで差はなかった。一方、破断ハンガーロープがある側径間では、解析モデル、解析理論の違いで異なる傾向であった。ただし、比率で表現すると、D+Lの状態に対して変化が大きい、変位量の絶対値が小さいため、わずかな変化が顕著に表れたものと考えられる。

### (d) 主塔の変位

図-12は、2P及び3P主塔における橋軸方向、橋軸直角方向、鉛直方向の、D+Lに対するNo.742破断後の変位の比率を示す。解析ケースは、図-9と同様である。

応答変化については、破断位置に近い2P主塔のみで生じている。橋軸方向変位は、簡易モデルを用いた微小変位解析で変化の比率が大きい。ただし、これは変位の絶対量が小さいことによるものと考えられる。図-13は、簡易モデルを用いた微小変位解析におけるD+Lに対するNo.742破断後の2P主塔の橋軸方向変位を示す。最も変位が大きいハンガーロープの状態ケース3でも、塔頂の橋軸方向変位は5mm強とわずかである。

橋軸直角方向変位については、簡易モデルでは、解析理論の違いで差が生じていない。一方で、詳細モデルを用いた有限変位解析では、2P主塔でハンガーロープの状態ケース3のR側で変化率が大きかった。

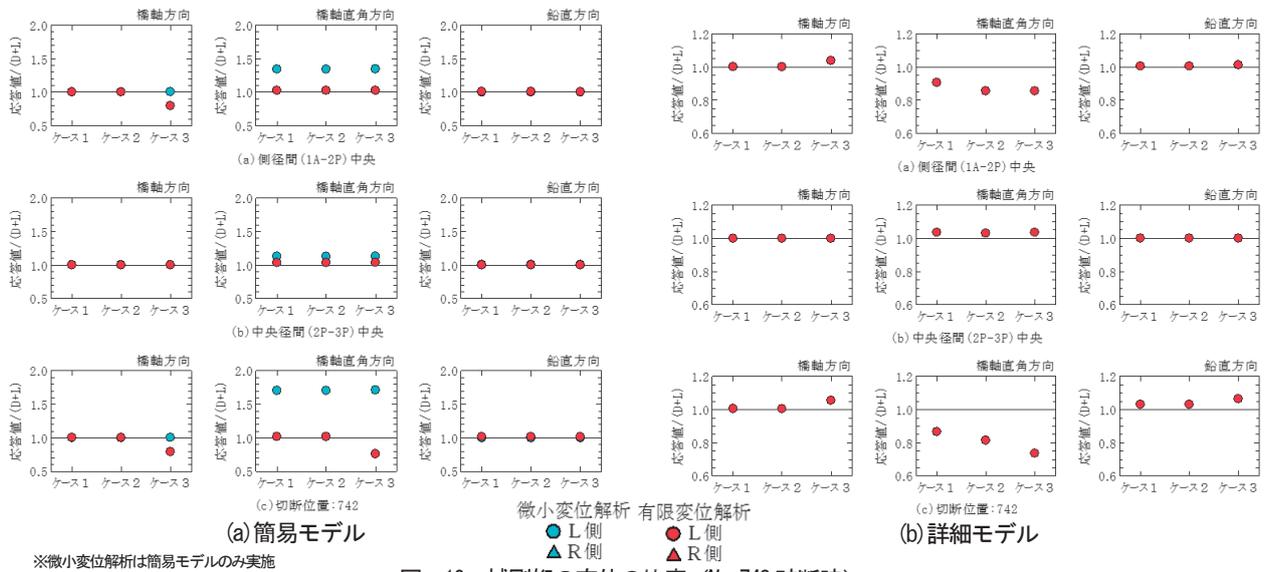


図-10 補剛桁の変位の比率 (No. 742 破断時)

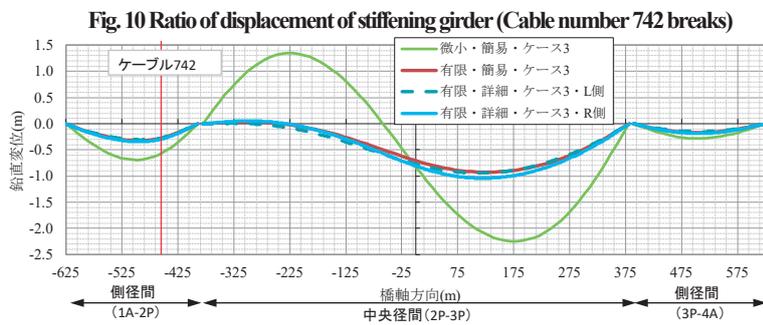


図-11 橋全体の補剛桁の変位 (No. 742 破断時)

Fig. 11 Displacement of stiffening girder of the bridge (Cable number 742 breaks)

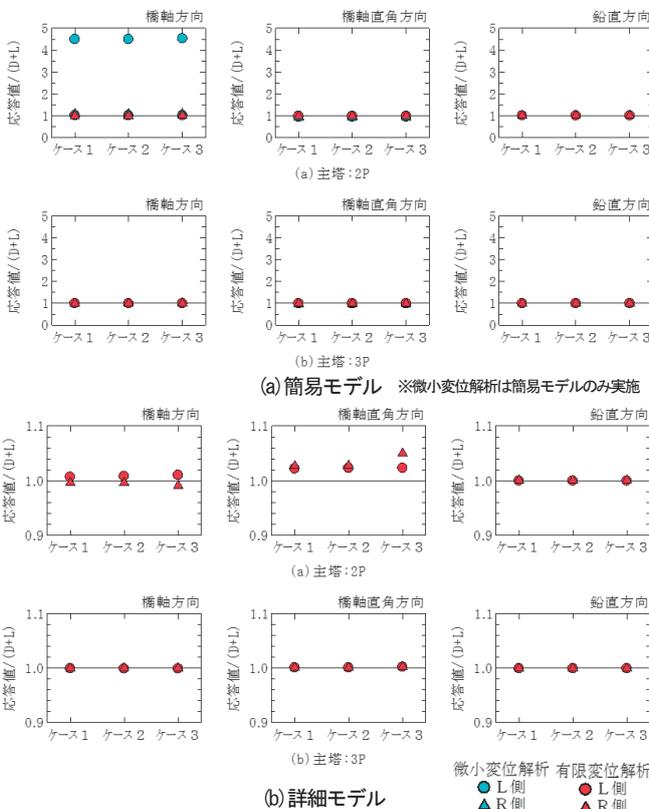


図-12 主塔の変位の比率 (No. 742 破断時)

Fig. 12 Ratio of displacement of main tower (Cable number 742 breaks)

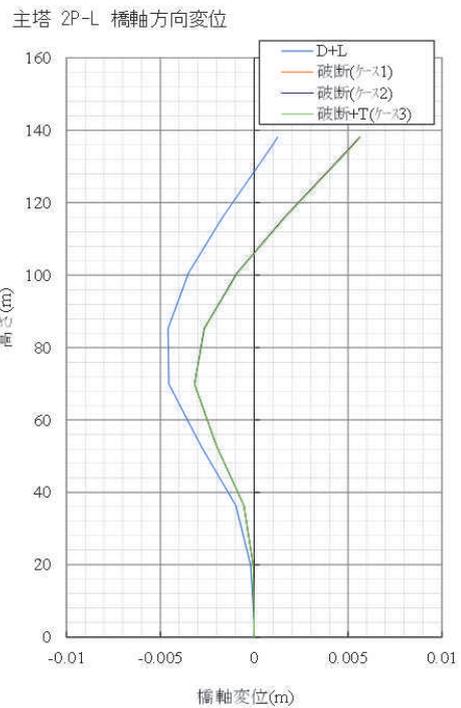


図-13 2P主塔の橋軸方向変位

(簡易モデル, 微小変位解析, No. 742 破断時)

Fig. 13 Bridge axial displacement of 2P main tower (simple model, micro-displacement analysis, cable number 742 breaks)

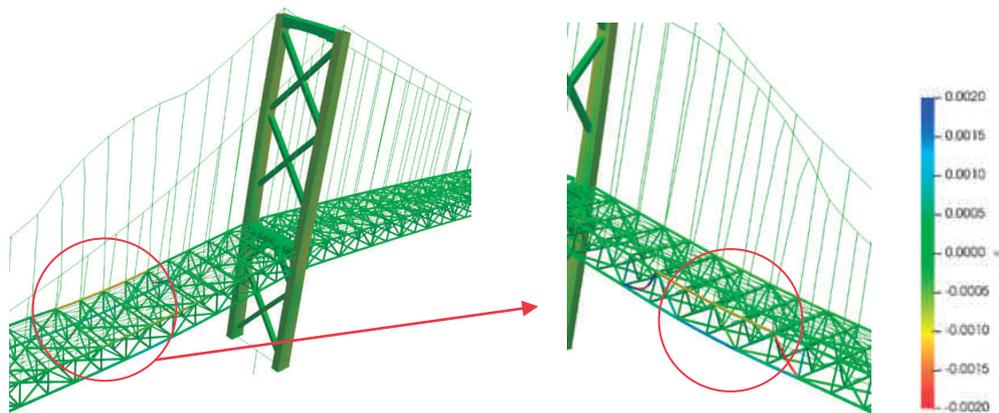


図-14 複数破断ケースの変形図・ひずみコンター図（詳細モデル，有限変位解析，ハンガーロープの状態ケース3）

Fig.14 Variant and strain contour plot of suspender ropes break (Detailed model, finite displacement analysis, case 3 of condition of suspender rope)

## (2)ハンガーロープの複数破断

複数破断の解析結果について，傾向を簡単に紹介する。

### (a)主ケーブルの張力

複数破断ケースでは，微小変位解析のみ変化が現れ，ハンガーロープを破断させた側の主ケーブルは張力が低下し，反対側の主ケーブルは張力が大きくなる傾向が見られた。ただし，反対側のハンガーロープの応答は大きくなっていないこと，主塔の橋軸方向の変形が大きいことから，鉛直方向周りの回転により主ケーブルの軸力差が生じている可能性がある。

### (b)ハンガーロープの張力

主な傾向は，単数破断ケースと同様で，破断ハンガーロープの隣接ハンガーロープの張力が大きくなり，その隣では微小変位解析では圧縮側に，有限変位解析ではただらかにD+L時の張力に変化している。

破断ハンガーロープの隣接ハンガーロープの張力はいずれのケースも大きくなるが，微小変位解析の方がその傾向は顕著である。いずれのケースも降伏強度は超過せず，破断による連鎖的な破壊現象は生じなかった。

また，ハンガーロープの状態による違いは，いずれのケースもケース3で応答が大きくなる傾向があった。

### (c)補剛桁の変位

詳細モデルを用いた有限変位解析の変形図を図-14に示す。ハンガーロープの状態はケース3である。このケースでは，斜材の全体座屈が生じる結果となった。

## 4.4 主ケーブルの断面減少

主ケーブルの状態は，R側を健全，L側を全区間の断面積を10%及び20%低減させ，簡易モデル及び詳細モデルに対して，それぞれ微小変位解析と有限変位解析を行った（表-6）。

補剛桁の鉛直変位に着目した解析結果を表-7~8及び図-15~16に示す。詳細モデルは，R・Lそれぞれの上弦材の変位量を算出しており，補剛桁の鉛直変位につい

ては平均値で整理した。なお，いずれのケースも，主ケーブルを含めた全部材は弾性範囲に留まっている。

### (1)解析理論による違い

死荷重時（D,10%減）の補剛桁の鉛直変位は，簡易モデル，詳細モデルともに，微小変位解析で約0.30m，有限変位解析で約0.25mであった。いずれの解析モデルも，微小変位解析の方が変位は大きく，有限変位解析に対して約1.3倍であった。

死活荷重時（D+L,10%減）の補剛桁の鉛直変位は，簡易モデル，詳細モデルともに，微小変位解析で約2.0m，有限変位解析で約1.4mであった。死荷重時と同様，微小変位解析の方が変位は大きく，有限変位解析に対して，約1.4倍となり，解析理論の違いによる影響は大きい。

また，詳細モデルでは，R・Lそれぞれの上弦材の鉛直変位を算出した。主ケーブルの断面積の低減を考慮しているL側で，桁の回転による影響でより大きな鉛直変位が生じる。

### (2)解析モデルによる違い

解析モデルの違いについて，複数の部材のモデル化が異なるため，簡易モデルと詳細モデルを単純に比較することは難しいが，傾向として以下が明らかとなった。

表-8に解析モデルの違いによる補剛桁の鉛直変位を示す。死荷重時（D,10%減）の微小変位以外は，いずれも簡易モデルより詳細モデルの方が変位は大きい。ただし，その変化率は約8%未満である。

## 4.5 考察

ハンガーロープの破断解析では，破断位置の隣接ハンガーロープの張力に着目すると，簡易モデルで微小変位解析の方が応答の変化が大きい。破断ハンガーロープの2本隣では，簡易モデルの微小変位解析ではハンガーロープの張力が小さくなる側に变化したのに対して，有限変位解析ではハンガーロープの張力が大きくなる側と逆の傾向を示し，その程度は微小変位解析の方が大きい。補剛桁についても，鉛直変位，橋軸方向変位は，簡易モ

表-6 主ケーブルの解析ケース

解析モデル	荷重状態	断面積の低減程度	幾何学的非線形の有無
簡易モデル	D, D+L	10%, 20%	微小変位
			有限変位
詳細モデル	D, D+L	10%, 20%	微小変位
			有限変位

表-8 解析モデルによる比較 (中央支間中央の鉛直変位)

	D, 10%減			D+L, 10%減		
	①簡易(m)	②詳細(m)	①/②	③簡易(m)	④詳細(m)	③/④
微小	-0.320	-0.306	1.05	-1.999	-2.051	0.97
有限	-0.254	-0.256	0.99	-1.361	-1.472	0.92

表-7 中央支間中央の鉛直変位と変化率

解析モデル	解析方法	①		②		③	④	⑤	
		D, 10%減		D+L, 10%減					
簡易	微小	-0.320	-	-1.999	-	6.25	1.26	1.47	
	有限	-0.254	-	-1.361	-	5.36	1.00	1.00	
詳細	微小	L側	-0.47	-2.051	L側	-2.34	4.92	1.20	1.39
		R側	-0.14		R側	-1.77	12.88		
	有限	L側	-0.40	-1.472	L側	-1.71	4.27	1.00	1.00
		R側	-0.11		R側	-1.23	11.05		

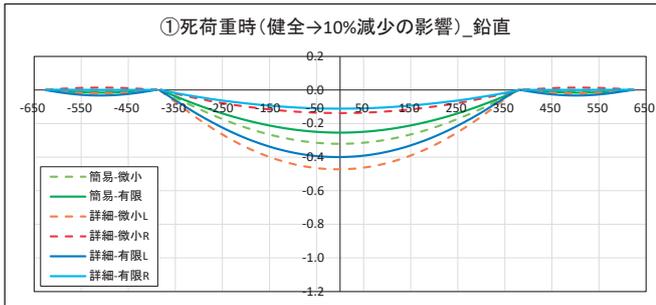


図-15 補剛桁の鉛直変位 (D, 10%減)

Fig.15 Vertical displacement of stiffening girder (D, 10% reduction)

デルの微小変位解析で変位が大きい。また、主ケーブルの断面減少に関する解析では、補剛桁の中央支間中央の鉛直変位で微小変位解析の方が大きい結果となった。

以上から、長大吊橋のケーブル部材の状態が橋の構造安全性に及ぼす影響評価のための構造解析においては、解析理論の違いで、特にハンガーロープ、補剛桁の応答に違いが生じることがわかった。

また、因島大橋の構造安全性の観点からは、ハンガーロープの1本破断では、主要な部材への影響はほとんどなく、5本破断の場合でも、補剛桁の斜材の全体座屈は生じているが、連鎖的な破断や落橋等に至る状態にはならないことが明らかとなった。この結果は、ハンガーロープの点検合理化につながる知見と考える。

5. おわりに

長大吊橋を対象に、ハンガーロープの破断及び主ケーブルの断面減少が橋の構造安全性に及ぼす影響評価の方法論を検討するため、解析モデル、ケーブル部材の状態、解析理論をパラメータとした構造解析を行った。本稿は、検討状況の一部を紹介するに留まったが、先行事例が少ない検討であり、今後の検討の参考になると考える。

引き続き、長大吊橋の点検最適化を目指し、ケーブル部材が橋の構造安全性に及ぼす影響評価に関する方法論の検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領,2019.2
- 2) 国土交通省：道路技術小委員会 HP

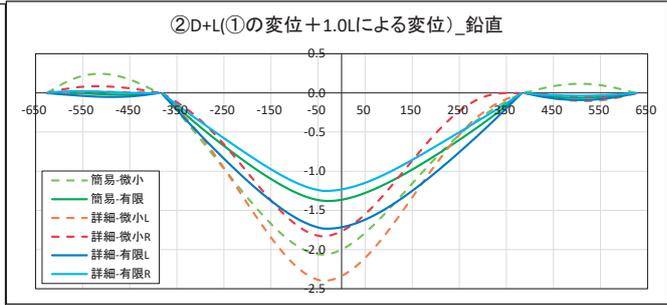


図-16 補剛桁の鉛直変位 (D+L, 10%減)

Fig.16 Vertical displacement of stiffening girder (D+L, 10% reduction)

- 3) Taiwan Transportation Safety Board : Final Report Released on Nanfangao Sea-Crossing Bridge Collapse, 2020.11
- 4) 玉越隆史：道路橋設計におけるリダンダンシーの評価に向けた取組み, 第17回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, 2014.8
- 5) 古家和彦, 磯江浩, 帆足博明, 平野茂：芸予地震における動態観測と来島海峡第一大橋センタースティロッド破断に対する検証, 鋼構造論文集, 第10巻, 第39号, pp.131-141, 2003.9
- 6) 上野勝敏, 山口隆司, 街道浩：各種ケーブルのクリープを考慮した中小無補剛吊橋の挙動に関する解析的研究, 構造工学論文集, Vol.65A, pp.432-440, 2019.3
- 7) 本州四国連絡橋公団：吊橋の健全度診断システムの検討(その3) 報告書, 1987.3
- 8) 本州四国連絡橋公団：因島大橋ハンガー影響解析報告書, 1999.2
- 9) 本州四国連絡高速道路(株)：鋼上部構造の安全性に関する検討業務報告書, 2011.3
- 10) 林宏行, 橋本国太郎：損傷したケーブルを有する少数ケーブル斜張橋の残存性能に関する解析的研究, 土木学会第72回年次学術講演会講演概要集, I-009, 2017.9
- 11) 本州四国連絡橋公団：因島大橋点検要領(案), 1984.3
- 12) 本州四国連絡橋公団：橋体の維持管理に係る構造解析用資料の整備業務報告書, 1999.3
- 13) 本州四国連絡高速道路(株)：因島大橋耐震性能照査業務報告書, 2018.9
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説, 2017.11
- 15) 国土交通省道路局国道・技術課：引張材を有する道路橋の損傷例と定期点検に関する参考資料(案), 2019.2

# 地域間産業連関表による本四高速道路の経済効果分析

Economic effect analysis of Honshu-Shikoku Bridges based on inter-regional input-output tables

片山 雄也 Yuya Katayama

企画部 経済調査課

小山 智 Satoshi Koyama

坂出管理センター  
管理グループリーダー  
(前) 企画部 経済調査課長代理

佐藤 高通 Takamichi Sato

東京事務所長  
(前) 企画部 経済調査課長

## 概要

本州四国連絡高速道路（以下「本四高速道路」という。）は、2018年4月には神戸淡路鳴門自動車道が全通20周年、瀬戸中央自動車道が開通30周年を迎え、また、2019年5月には西瀬戸自動車道が開通20周年を迎えた。

この間、本州と四国間相互の交流圏域は大幅に拡大し、沿線地域では工業製品・農水産品の出荷額の増加、物流関連施設の新規立地、観光入込客数の増加など様々な効果が発現している。

そこで、瀬戸中央自動車道が開通した1988年から2018年にかけて本四高速道路が日本経済へ及ぼした効果を定量的に把握するため、地域間産業連関表を用いた仮説的抽出法により分析した結果をとりまとめた。

The Honshu-Shikoku Bridges connect Honshu and Shikoku region of Japan with three expressways. In April 2018, the Kobe-Awaji-Naruto Expressway and the Seto Chuo Expressway marked the 20th and 30th anniversaries, respectively. In May 2019, the Nishi-Seto Expressway (Setouchi Shimanami Kaido) celebrated its 20th anniversary.

Since the completion of the Honshu-Shikoku Bridges, the expressway network around Seto Inland Sea including the Honshu-Shikoku Bridges has expanded, and the mutual exchange area between Honshu and Shikoku has also expanded significantly, and the expansions has brought about various socio-economic effects such as the increase of shipment value of industrial, agricultural and marine products in the areas along the expressway, newly establishment of logistics-related facilities, and the increase in the number of tourists.

In order to quantitatively understand the effect of the Honshu-Shikoku Bridges on the Japanese economy from the opening of the Seto Chuo Expressway in 1988 to 2018, the interregional input-output table was analyzed by applying the hypothetical input method.

## 1. はじめに

本州四国連絡高速道路（以下「本四高速道路」という。）は3本の高速道路により本州と四国の間を結んでいる。2018年4月に神戸淡路鳴門自動車道が全通20周年、瀬戸中央自動車道が開通30周年を迎え、また、2019年5月には西瀬戸自動車道が開通20周年を迎えている。

この間、時間短縮、随時性・確実性の確保による交流圏域の拡大によって、沿線地域の生活圏、商圏等が拡大した。これらを背景に、生活・文化、経済・産業など様々な分野において、沿線地域を中心に様々な効果が発現している。また、本四高速道路による効果は、地域・産業間の取引を通じて、沿線地域以外にまで波及し、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、瀬戸中央自動車道が開通した1988年から2018

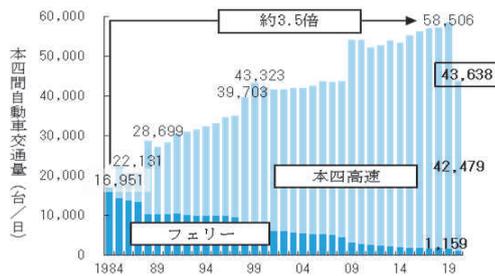
年にかけて本四高速道路が全国の各地域・各産業に及ぼした経済波及効果について定量的に把握することを目的とし、産業連関分析の分野でその研究と応用が進められている仮説的抽出法（hypothetical extraction method）の適用を中心に分析した結果をとりまとめたものである。

## 2. 本四間流動の推移

### 2.1 通行台数の推移

本州と四国間の自動車交通量は、各ルート開通時に大幅に増加している。また、瀬戸内地域周辺の高速度ネットワークの拡充や割引制度の拡充等とともに交通量は増加し、2019年度には、本州と四国間の交通手段がフェリーしかなかった大鳴門橋開通前の1984年度と比較して3倍以上の交通量に達しており、全国平均よりも大きく増加している。ただし、2020年度は新型コロナウイ

ルス感染症の拡大により、自動車交通量は大幅に減少した(図-1)。



※全国の自動車交通量は1995年度から2015年度の間で1.4倍に増加

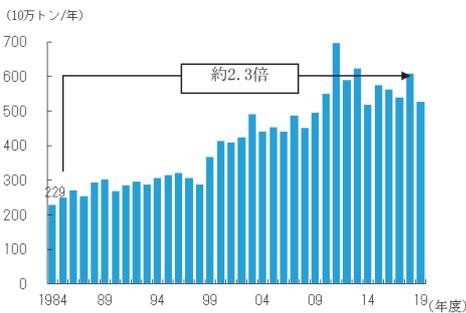
出典：JB本四高速資料、「四国における運輸の動き」(四国運輸局)、「全国道路・街路交通情勢調査」平均交通量(高速道路+一般道路)(国土交通省)より作成

図-1 本四間自動車交通量の推移

Fig.1 Changes in automobile traffic between Honshu and Shikoku

## 2.2 自動車貨物流動量の推移

本四高速道路の開通によって、地域間交易が拡大され、全国と四国間(地域内は含まない)の自動車貨物流動量は2019年度には1984年度と比較して2倍以上の流動量に達しており、全国平均よりも大きく増加している(図-2)。



※全国のブロック間自動車貨物流動量は、1984年から2019年度の間で1.3倍に増加

出典：「貨物・旅客地域流動調査」(国土交通省)より作成

図-2 四国発着の自動車貨物流動の推移

Fig.2 Changes of automobile cargo flows between Shikoku and other regions in Japan

## 3. 経済効果額の算出

### 3.1 計測手法

前に示したように、本四間流動は全国平均よりも大きく増加し、本四高速道路の役割は年々高まっており、地域間をまたがる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。

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、各年の経済効果の算出を行うこととした。

計測手法としては、地域間産業連関表を使った「仮説的抽出法」(hypothetical extraction method)を、本四間交易を対象に適用することとした。

### 3.2 本稿における仮説的抽出法の適用

本稿では、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、「本四高速道路がない」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)の粗付加価値額(≒GDP)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)粗付加価値額(≒GDP)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(図-3)。



図-3 計測方法のフロー図

Fig.3 Flow diagram of measurement method

### 3.3 地域間産業連関表

地域間産業連関表とは、全国を9地域(北海道、東北、関東、中部、近畿、中国、四国、九州、沖縄)に分割し、地域間の財やサービスの取引の流れを明らかにしたものである。表を横方向に見ると、生産された財がどの地域にどれだけ販売されたかを表しており、表を縦方向に見ると、財を生産するのにどの地域からどれだけ投入されたかを表している。ある産業に新たな需要が生じると、

その需要を満たすために各産業で生産が生じ、最終的に各産業でどのくらいの生産額が誘発されるかを計算することが可能である（図-4）。

生産物の販路構成 →

		中間需要※1			最終需要※2			生産額
		中国	四国	近畿	中国	四国	近畿	
中間投入	中国	40	80	20	60	40	40	280
	四国	120	180	60	10	10	20	400
	近畿	60	40	40	10	20	10	180
粗付加価値額		60	100	60				
生産額		280	400	180				

（一概ねGDPに相当）

※1 財やサービスを生産するために必要な原材料等に対する生産者の需要

※2 完成品として販売される商品に対する消費者等の需要

図-4 地域間産業連関表イメージ図

Fig.4 Image of inter-regional input-output table

### 3.4 本四高速道路分担額の整理・分析

地域間産業連関表は、金額ベースで地域間取引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額を導出することが必要である。つまり、本四間の取引額を表している（図-4）の網掛け部のうち、本四高速道路分担分を金額ベースで算出する必要がある。

重量ベースでは、貨物地域流動調査（国土交通省）を用いると、本四間の品目別輸送機関別分担率を算出できるが、フェリー利用自動車と本四道路利用自動車に区別がないため、フェリーによるトラック輸送台数（四国運輸局データ）と本四高速道路利用大型車台数（本四高速データ）の割合で按分することによって、重量ベースで本四高速道路分担率を算出した。

さらに、重量ベースで算出した分担率を地域間産業連関表の本四間取引額に乗じることによって金額ベースで本四高速道路分担額を算出した。

### 3.5 フェリーの代替について

本四高速道路による効果の過大評価を避けるため、本四高速道路がない場合の流動量は、「本四高速道路供用前と同水準でフェリーが運航され、当該貨物流動量はフェリーが代替するもの」と仮定した。

さらに、経済成長を考慮し、本四高速道路がない場合、フェリーの輸送量は道路交通センサスの大型車交通量（全国）の伸びと同率で推移するものと想定し、供用前よりもフェリーの輸送量が増加しているものと設定して推計した（図-5）。

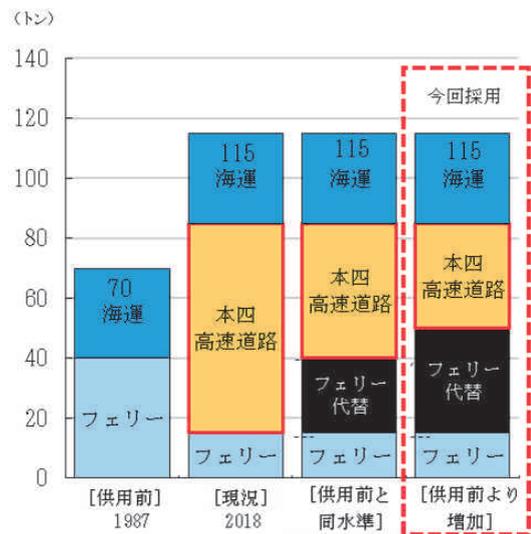


図-5 フェリー代替のイメージ図

Fig.5 Image of ferry alternative

## 4. 経済効果額の算出結果

### 4.1 経済効果額

以上を踏まえた、架橋効果の算出結果は（図-6, 7）のとおりであり、2018年（単年）の効果額は全国で約2.4兆円、このうち四国に対しては約0.9兆円と推計され、この額は2018年の四国4県の総生産（約14兆円）の約6%に相当している。

その他の地域では、近畿地方に約0.4兆円、関東地方に約0.4兆円、中国地方に約0.3兆円など、本四高速道路が日本経済全体に大きく貢献していることが分かる。

また、瀬戸中央自動車道が開通した1988年から2018年までの累計（31年間）の効果額は全国で約41兆円と推計された。

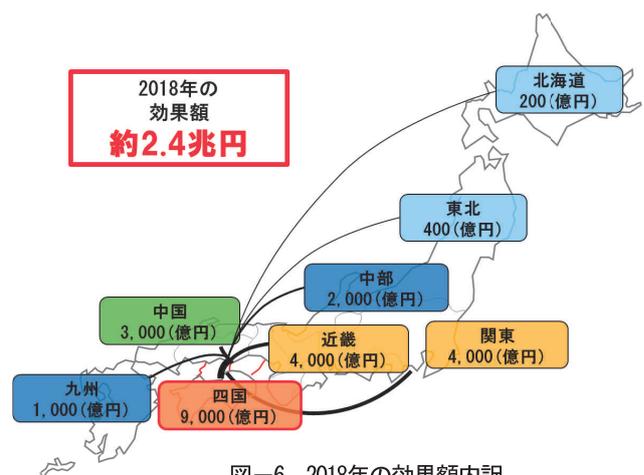


図-6 2018年の効果額内訳

Fig.6 Breakdown of economic effect

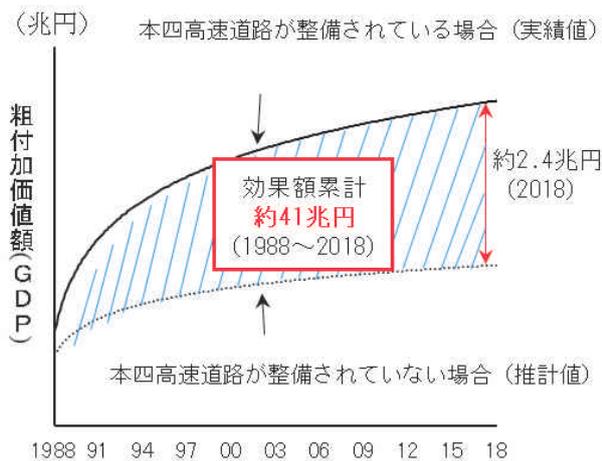


図-7 効果額計測のイメージ図  
Fig.7 Image of effect estimation

#### 4.2 産業別の内訳

2018年の全国の効果額を産業別に見ると、「食料品・たばこ・飲料」が約0.28兆円（約12%）で最も多く、続いて「商業」が約0.23兆円（約10%）、「化学工業製品」が約0.23兆円（約9%）、「対事業所サービス」が約0.19兆円（約8%）、「農林水産業」が約0.17兆円（約7%）となっている（図-8）。

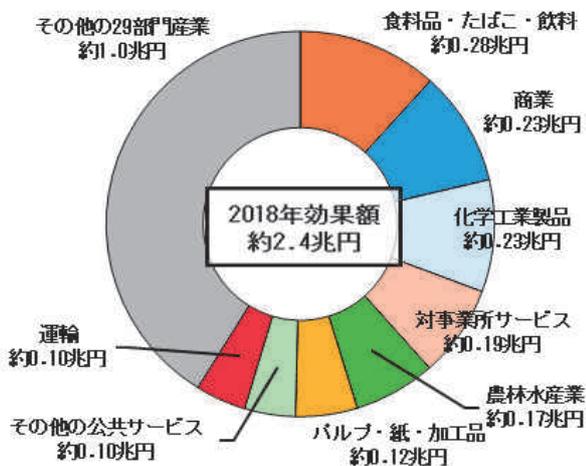


図-8 経済効果の産業別内訳  
Fig.8 Breakdown of economic effect by industry

### 5. 本四高速道路の整備効果事例

本四高速道路の開通により、社会・経済・観光・防災など様々な整備効果が発現しており、そのうちのいくつかを紹介する。

#### 5.1 徳島県のLED産業集積に貢献

徳島県には、高輝度青色LEDを世界で初めて製品化した企業をはじめ、100社以上のLED関連企業が集積して

おり、「LEDバレイ構想」を推進する徳島県では、LEDに関する研究開発の拠点形成、高度技術者の育成に取り組んでいる。

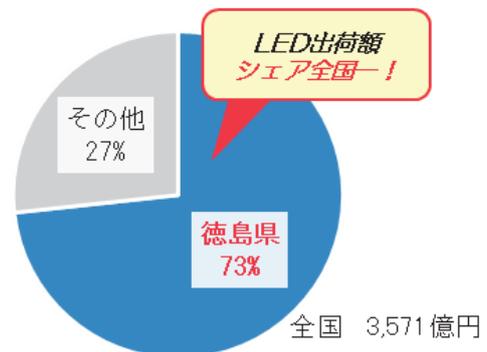
徳島県のLED出荷額は年々増加し、2018年の出荷額は約2,617億円、全国シェアでは約73%を占め、日本一となっており、原材料の調達や製品の納品は主に神戸淡路鳴門自動車道を利用して配送・調達を行っている（図-9, 10）。



出典：「工業統計調査」（経済産業省）より作成

図-9 徳島県 LED出荷額の推移

Fig.9 Changes in LED shipment value from Tokushima Prefecture



出典：「工業統計調査」（経済産業省）より作成

図-10 LED出荷額全国シェア (2018年)

Fig.10 LED shipment value-national market share

#### 5.2 中四国の物流ハブとして機能が高まる香川県・岡山県

瀬戸大橋の開通や、高速道路ネットワークの拡充により、香川県・岡山県は物流のクロスポイントとして重要度が増加している。

瀬戸大橋開通後は、坂出IC・坂出北IC近辺の香川県坂出市・宇多津町や、早島ICのある岡山県早島町において、各自治体による立地促進対策等により、運輸業等の物流関連施設の立地が相次いでいる（図-11）。



出典：RESAS（地域経済分析システム）ほかより作成

図-11 瀬戸大橋近辺の物流関連施設立地状況

Fig.11 Locations of distribution-related facilities near Seto-Ohashi

Bridges

5.3 本四3ルートによる代替路としての機能

2018年は豪雨や台風が多発して各種交通機関の通行止め・運休が発生した。

2018年9月の台風21号により、神戸淡路鳴門自動車道と瀬戸中央自動車道が通行止めとなったが、しまなみ海道が迂回路として機能し、交通量が約65%増加した（図-12）。

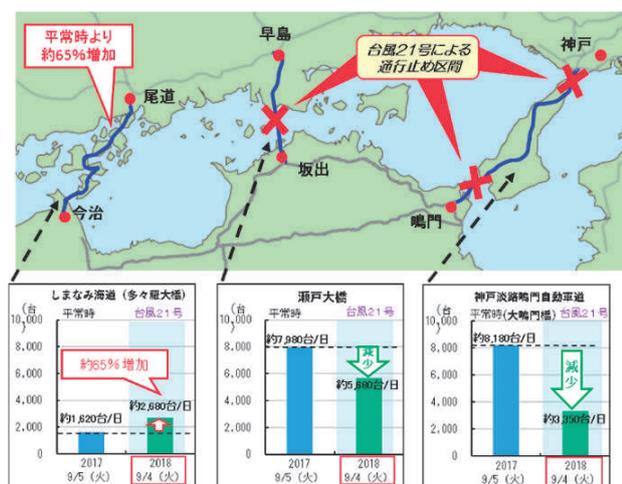


図-12 本四3ルートによる代替路としての機能

Fig.12 Honshu-Shikoku Bridges can function as 3 alternative routes

6. おわりに

本稿では、本四高速道路を利用する物流に照準を定め、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、四国と本州各地域間の効率的な輸送が可能となり、企業や個人の生産性を向上させ、全国各地域の経済活動に影響を及ぼしている。

なお、本稿での経済効果の計測と分析は、2018年までを対象としたものとなっているが、今後、本四高速道路の利用に伴う交通量の増加が続けば、その生産誘発額の規模や影響の及ぶ範囲は、引き続き拡大が続くものと考えている。

謝辞

本検討にあたり、計測手法、開発した計測方法の確認などについてご指導いただいた、香川大学 井原健雄名誉教授、岡山大学大学院 社会文化科学研究科 中村良平特任教授に、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—アジア国際産業連関分析—, アジア経済, pp.128-148, 2003
- 2) 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
- 3) 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—仮説的抽出法による計測—, 土木計画学研究発表会・講演集, Vol. 54, 2016
- 4) 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

# 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

鳴門管理センター  
所長  
(前)長大橋技術センター  
防食・耐風グループリーダー

臼田 幸生 Yukio Usuda

神戸管理センター  
副所長  
(前)保全部  
橋梁保全課長

山根 彰 Akira Yamane

(株)ブリッジ・エンジニアリング  
技術事業本部 技術第1課長  
(前)長大橋技術センター  
防食・耐風グループ エキスパート

## 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、省工程型塗料の開発、塗膜消耗特性と塗膜劣化予測などを中心に検討を実施した。

本稿は、塗装（鋼）WGにおいて令和2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

塗替塗装費の縮減及び環境負荷の低減が期待される省工程型塗料は、令和元年にHBS塗料規格として制定された。この省工程型塗料の屋外暴露耐候性は宮古島3年暴露後の光沢保持率50%以上と規定しているが、現在これを満足し、かつ供給可能な塗料は1種類のみである。そのため平成31年から規格を満足することが期待される省工程型塗料の暴露試験を開始しており、24ヵ月経過時点の光沢保持率測定を行った。その結果、24ヵ月経過時点で80%以上の光沢保持率を有することを確認した（図-1）。

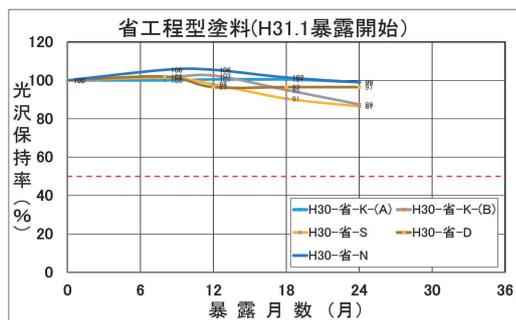


図-1 省工程型塗料の光沢保持率（24ヵ月経過）

Fig.1 Rate of gloss retention

## 3. 塗替塗装した橋梁の残存膜厚調査

1回目の塗替塗装が施工済みである大鳴門橋で残存膜厚の調査を実施した。調査箇所は、主塔・補剛桁・鋼床版とし、約300点で測定を行った。その結果、無機ジンク層を除いた残存膜厚は平均で約300 $\mu$ m、最大で約

600 $\mu$ mと厚い塗膜が残っていることがわかった（表-1）。

表-1 大鳴門橋残存膜厚調査結果（無機ジンク層は除く）

Table 1 Film thickness of Ohmaruto Bridge

	主塔	補剛桁	鋼床版	全データ
データ数	12	213	84	309
平均値	412.9 $\mu$ m	325.4 $\mu$ m	287.9 $\mu$ m	318.6 $\mu$ m
最大値	571.9 $\mu$ m	637.6 $\mu$ m	545.9 $\mu$ m	637.6 $\mu$ m
最小値	273.7 $\mu$ m	173.1 $\mu$ m	98.0 $\mu$ m	98.0 $\mu$ m
標準偏差	83.1 $\mu$ m	75.4 $\mu$ m	97.1 $\mu$ m	85.7 $\mu$ m

## 4. 上塗り塗料の塗膜消耗速度調査

塗膜の劣化予測計算を行うためには、各塗膜の残存膜厚と塗膜消耗速度の平均値及び標準偏差が必要となるが、中塗りと下塗りについては令和元年度に調査が完了し、上塗りの調査を継続している。令和2年度は明石海峡大橋で調査を行い、表-2の結果が得られた。

表-2 塗膜消耗速度調査結果（ふっ素樹脂塗料）

Table 2 Reduction rate of coat thickness

橋梁名	塗料	調査部位	調査時期	測定数	平均値 ( $\mu$ m/年)	標準偏差 ( $\mu$ m/年)
明石海峡大橋	上塗り ふっ素樹脂塗料	主構垂直材(外面) 主構下弦材(上面)	2020年 (7.2年目)	32	0.36	0.03

## 5. 無機ジンク層凝集破壊の原因推定

瀬戸大橋での塗替塗装面積に占める無機ジンク層凝集破壊部補修面積の推移を調査した結果、補修面積は平成20年頃がピークで、その後は減少傾向となっていた。また、補修箇所は一部のパネルの鋼床版裏面に偏っていることがわかった。このことから現在発生している無機ジンク層凝集破壊の原因は、無機ジンク塗装時の影響（過膜厚等の品質管理不足）が大きいものと推定した。

## 6. まとめ

今後も引き続き、上塗り塗膜の消耗特性調査、塗膜消耗以外の劣化要因調査、素地調整方法の調査等を実施し、橋梁の塗装について検討を行う予定である。

# 防食分科会コンクリート保護工WGの取組

Report of Working Group for concrete coating system, Anticorrosion Subcommittee

大賀 弘貴 Hiroataka Oga

(株)ブリッジ・エンジニアリング  
技術事業本部 技術部  
(前)長大橋・技術部  
技術革新・アセットマネジメントグループ

竹口 昌弘 Masahiro Takeguchi

鳴門管理センター  
所長  
(前)長大橋技術センター  
防食・耐風グループリーダー

## 1. 検討目的及び経緯

コンクリート保護工WGではこれまで、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、既設塗膜の補修方法を検討している。

また、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。）の劣化対策として、塗膜系よりLCCの縮減が期待できる表面保護工の性能評価を行うため、表面保護工の試験施工箇所を対象に、継続調査している。

本稿は、コンクリート保護工WGにおいて令和2年度に実施した主な検討概要について報告するものである。

## 2. ASR対策工の内部含水率調査

ASRによる劣化対策として、コンクリートの内部含水率の低減を目的に、遮水性及び内部の水分を外部へ排出する透湿性を有する表面保護工を施工している。多々羅大橋ケーブル定着部（写真-1）に試験施工（H26.2施工）された複数仕様の表面保護工について、内部含水率の追跡調査を実施し、施工後6年5カ月の表面保護工の効果の検証を行った。



写真-1 定着部保護コンクリート  
Photo 1 Fixing part protection concrete

その調査結果を図-1示す。仕様A、Cでは、施工後約半年で内部含水率の低下が見られたが、その後は上昇傾向であり、本調査時には施工直後と同水準の内部含水率も見られた。仕様Bでは、施工後約半年より内部含水率が低下し、その後経年でも低い内部含水率を保持していた。仕様Dについては、施工直後から現在まで内部含水率の低下はあまり見られなかった。これらの結果から、

施工後6年5カ月であることを踏まえると、本構造物では仕様A、C、Dによるこれ以上の内部含水率の低下は期待できないが、仕様Bでは表面保護工の効果は継続していると考えられる。

今年度は他にも、橋脚部側面の試験施工箇所である櫃石島高架橋、与島高架橋の追跡調査も実施しており、これらの結果を踏まえて今後ASR対策マニュアルを作成する予定である。

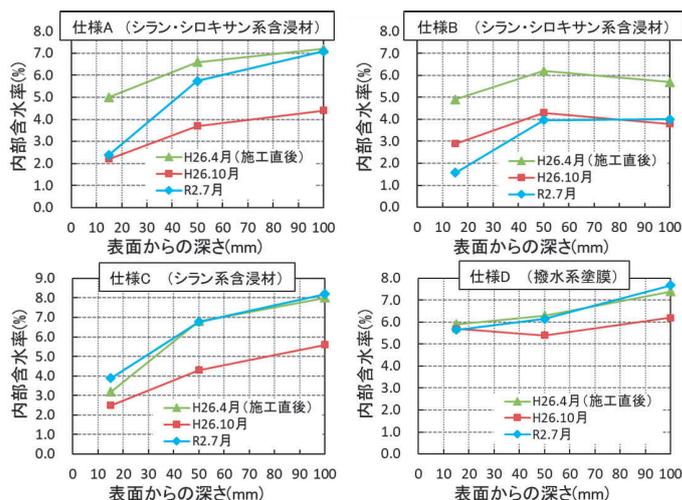


図-1 内部含水率の調査結果

Fig.1 Results of internal water content

## 3. まとめ

令和2年度に実施したコンクリート保護工WG主な検討として、ASR対策工の性能評価について、多々羅大橋ケーブル定着部に試験施工された仕様A～Dの内部含水率の追跡調査を実施した。その結果から、本構造物では仕様Bのみ施工後6年以上経過しても表面保護工の効果は継続していると考えられる。これらの差については、今後も調査を継続し、検討していきたいと考えている。

ASR対策工の性能評価については、神戸大学との共同研究や試験施工箇所の継続調査により検討を継続し、これまで得られた知見や検討結果を、今後のASR対策マニュアル作成へ反映させていきたい。

# 防食分科会 海中基礎防食WG, ケーブル送気WG, ハンガーロープ・斜ケーブルWG, 橋梁付属物WGの取組

Report of Working Group for anticorrosion for underwater foundations, cable dehumidification system, suspender rope, stay cable and bridge accessories, Anticorrosion Subcommittee

村上 博基 Hiroki Murakami

保全部  
橋梁保全課長

橋本 龍 Ryu Hashimoto

保全部  
橋梁保全課

## 1. 検討目的及び経緯

保全技術交流会議の防食分科会では、6つのWGを設置して検討を実施している。本稿では、その内の海中基礎防食WG, ケーブル送気WG, ハンガーロープ・斜ケーブルWG及び橋梁付属物WGにおいて令和2年度に実施した検討概要を報告するものである。

## 2. 検討内容

### 2.1 海中基礎防食 WG

海中基礎防食 WG では、鋼製海中基礎の環境条件に応じた最適な防食方法確立、鋼ケーソン内部のコンクリートの劣化メカニズム解明、緩衝工を考慮した海中基礎防食工法の立案に向けて活動を行ってきた。現在は、これらのために南備讃瀬戸大橋の緩衝工の劣化状況と瀬戸大橋、明石海峡大橋の基礎コンクリートと同配合供試体の海中での劣化状況の追跡調査を継続している。令和2年度は、明石海峡大橋と同配合の水中不分離性コンクリート供試体について暴露6年目の調査(写真-1)を実施しており、モルタルの浸食・骨材露出の傾向が見られたことから暴露試験を継続する予定である。

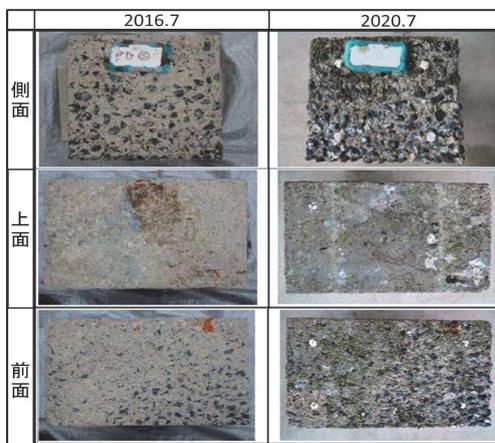


写真-1 水中不分離性コンクリート暴露供試体の経年変化  
Photo 1 Exposure test of anti-washout underwater concrete

### 2.2 ケーブル送気WG

ケーブル送気WGでは、吊橋主ケーブルの防食性を高めるため、気密性を確保する被覆やコーキングの最適手法確立、送気乾燥システムの効率化のため、異常を早期に把握するための仕組みを検討してきたところである。

現在は、主ケーブルラッピングの塗替仕様及び主ケーブルゴムラッピングの補修仕様の確立に向け、実橋等での暴露試験(写真-2)を継続している。また、送気乾燥空気の状態の早期把握、計測の効率化のために計測の自動、常時観測化を進めており、常時観測による外部環境と送気乾燥空気の状態の把握を行うことで、システムの効率化につなげることを目指している。さらには、主ケーブル鋼材の腐食環境を、乾燥空気のモニタによる間接的な状態把握に加えて、鋼材の腐食環境を定量的に把握することを目指し、腐食センサー(RCMセンサー)の試行を行ったところである。



写真-2 ゴムラッピング補修仕様暴露供試体の経年変化  
Photo 2 Exposure test of wrapping rubber of main cable

### 2.3 ハンガーロープ・斜ケーブルWG

ハンガーロープ・斜ケーブルWGでは、CFRCハンガーロープの補修塗装仕様について検討を行い、浸漬塗装の作業効率向上のために塗料粘度について、実橋施工での最適値の確認を行ってきた。また、PE被覆された斜張橋ケーブルの内部状況の把握方法確立のために、多々羅大橋、生口橋において非破壊試験方法の検討及び、サンプリング調査(図-1)を行っている。

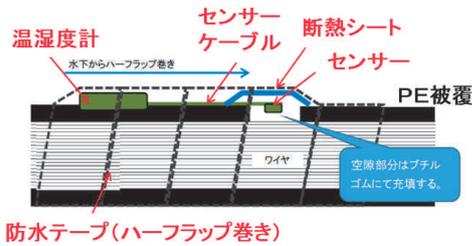


図-1 斜ケーブル内部温度湿度計測イメージ

Fig.1 Temperature and humidity monitoring of stay cable

## 2.4 橋梁付属物WG

橋梁付属物WGでは、変状が著しくさらに数量が膨大な鋼床版縦桁支承の延命化対策の検証を行ってきた。また、支承機能喪失が周辺部材に与える影響を確認し、支承交換の判定基準、合理的な延命対策の検討を行ってきた。

令和2年度は、与島橋の耐震補強工事で撤去されたBP-B支承のうち、支承内部の劣化が進み、腐食堆積物等ですき間が詰まっているものについて载荷試験を実施した。また、清掃や内部部品交換により機能回復が可能なかを確かめるために、下沓ポッド、中間プレート等を実物同形状に作成した新品相当品や、劣化した支承の腐食堆積物を清掃したものについても载荷試験での挙動比較を行った。

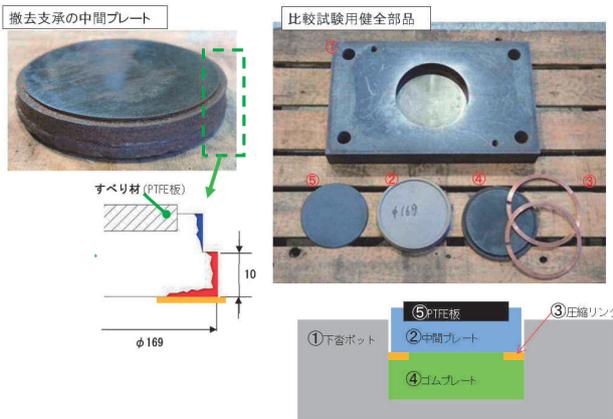


図-2 支承内部構造と腐食損耗の断面イメージ

Fig.2 Corrosion deterioration of bridge bearing

腐食堆積物で固着しているBP-B支承は、载荷試験の結果では固着はしていても健全な部品のものより载荷時の変形量が大きく、本来の構造とは異なる形で回転機能は確保できている可能性がある。これは、中間プレートの腐食による断面減少で圧縮リングの効果が低くなることによるものと推察された(図-2)。

さらに、周辺部材に与える影響検証のために、鋼床版縦桁支承固着時の縦桁等の疲労耐久性に着目し、FEM解析による評価を行った。FEM解析による疲労照査の結果、鋼床版縦桁支承の機能低下で周辺部材の疲労耐久性が大きく低下する可能性があることを確認した。疲労寿命に達する可能性が高いのは縦桁支点部の垂直補剛材である。現時点では、当該部位に疲労亀裂等の損傷が確認されていないことから、当該部位の現地計測や交通実態などから、今回の疲労照査結果の検証・評価を行い、縦桁支承の維持管理方針策定に反映する予定である。

## 3. まとめ

防食分科会による活動は、令和2年度をもって区切りとなるが、今後も引き続き必要な検討を行い、効率的な点検・補修方法、ライフサイクルの延長につながる補修計画立案につなげる予定である。

# 疲労分科会の取組

Report of Fatigue Subcommittee

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

長大橋・技術部 次長  
(前)長大橋技術センター 次長  
(兼)診断・構造グループリーダー

有馬 敬育 Noriyasu Arima

長大橋・技術部 技術革新・アセットマネジメントグループ エキスパート(診断・構造担当)  
(前)長大橋技術センター 診断・構造グループサブリーダー

内野 隆太郎 Ryutaro Uchino

長大橋・技術部 技術革新・アセットマネジメントグループ  
(前)長大橋技術センター 診断・構造グループ

## 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に、新技術の開発・活用検討を実施している。

本稿では、疲労分科会において令和2年度に実施した内容について概要を述べる。

## 2. 鋼床版疲労点検の合理化検討

### 2.1 経緯

都市高速道路の重交通路線などの橋梁において、車両通行時の繰り返し荷重による、いくつかのタイプの疲労亀裂が見ついている。このうち、鋼床版における輪荷重直下のデッキプレート（以下「デッキ」という。）とUリブ溶接部のルート部から発生、ビード内を進展し、ビードを貫通する亀裂（以下「ビード貫通亀裂」という。）（図-1）は多く発見されている<sup>1)</sup>。本四連絡橋においても、ビード貫通亀裂が確認されたため、この亀裂を、低コストかつ効率的に検出できる非破壊検査法として、亀裂の断熱効果により生じる温度差（温度ギャップ）を赤外線サーモグラフィを用いて検知することで、亀裂を検出する“温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法”（以下「温度ギャップ法」という。）を神戸大学との共同研究において開発、点検システムを実用化した<sup>2)</sup>。

本四連絡橋は多数の鋼床版を有していることから、設計年度や構造ディテール、累積交通量などを考慮して点検対象箇所を選定し、開発した点検システムを用いて点検を計画的に行っている。令和2年度は、瀬戸大橋及び大鳴門橋で疲労点検を実施した。

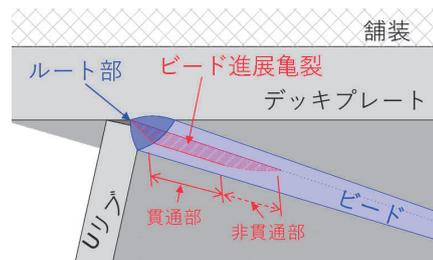


図-1 ビード貫通亀裂

Fig.1 Bead-penetrating crack

### 2.2 鋼床版疲労基礎点検

大鳴門橋における鋼床版疲労基礎点検は令和元年度から開始し、令和2年度は中央径間部（20パネル）について実施した。

一方、瀬戸大橋においては、平成27年度から点検を開始し、令和2年度は下津井瀬戸大橋と南備讃瀬戸大橋について実施した。

大鳴門橋、瀬戸大橋とも現在までにビード貫通亀裂は確認されていない。

### 2.3 今後の予定

大鳴門橋は、鋼床版疲労基礎点検を令和8年度に完了する計画で順次進めていく予定である。

瀬戸大橋は、令和3年度にトラス橋区間の点検を実施すると、すべての橋梁の点検が完了する予定であり、適切な次回点検時期について検討する。

また、明石海峡大橋以降に鋼床版の設計で反映された構造ディテールが適用されず、かつ累積大型車交通量が多い橋梁を瀬戸大橋点検完了後の対象候補として、塩生橋及び撫養橋（上り）で温度ギャップ法を適用するための課題の整理や設備の検討等を行う予定である。

## 3. 道路鉄道併用橋の疲労安全性評価に関する検討

### 3.1 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<sup>4)</sup>。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、亀裂が許容値に達するには100年以上要することが確認され<sup>5)</sup>、その後の追跡調査は行われていない。

現在、瀬戸大橋には設計時に想定されていた新幹線は載荷されず、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、現状の疲労環境を評価するため、現地計測を実施した。

### 3.2 現地計測

現地計測は、吊橋、斜張橋、トラス橋を代表して、過去、平成28年度に南備讃瀬戸大橋、平成29年度に櫃石島橋で実施しており、令和2年度は与島橋（2径間）で実施した。

過去の吊橋、斜張橋での計測部材は、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で、製作時AUT検査で大きな“きず”のある部材を選定したが、与島橋の計測では、計測のための足場として使用する塗替塗装足場が設置されている範囲に“きず”のある部材がなかったため、活荷重による変動応力が大きい部材を選定した。計測部材と応力計測箇所を図-2に示す。

測定結果及び疲労寿命算出結果を吊橋、斜張橋の結果と併せて表-1に示す。応力範囲の最大は、貨物列車（電気機関車1両+貨物車両22両）通過時に11MPaを計測し、設計疲労許容応力範囲78MPaに対して14%程度であった。また、繰り返し载荷回数に当たる列車運行本数は、貨物列車と旅客列車を合わせて151本/日であり、設計時想定208本/日の73%程度である。

これらの結果より、鋼道路橋疲労設計便覧<sup>6)</sup>に示される修正マイナー則で算出される、トラス橋主構下弦材の疲労寿命は30,000年程度と疲労環境としてはかなり安全であることを確認した。

吊構造橋梁では作用に対して橋体に変形しやすく、特に吊橋では死荷重に対する活荷重の割合が大きく、活荷重作用時の部材の変動応力が大きくなる。表-1に示した吊橋の結果を見ても疲労寿命は700年程度であり、瀬戸大橋全体としても疲労条件は設計時想定よりも緩やかであり、疲労亀裂の発生及び進展に対して十分安全であると判断できる。

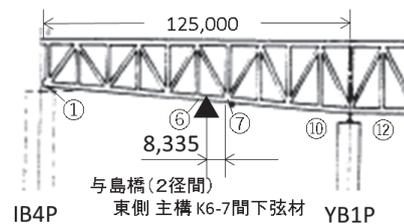


図-2 計測位置

Fig.2 Measurement locations

表-1 トラス桁の計測応力範囲及び疲労寿命

Table 1 Measured stress range and fatigue life of truss girder

計測箇所 [トラス桁主構下弦材]		吊橋 南備讃瀬戸大橋 K113-K114間	斜張橋 櫃石島橋 K3-K4間	トラス橋 与島橋（2径間） K6-K7間	
設計	荷重	1080 ton[1.00]	1391 ton[1.00]	1391 ton[1.00]	
	最大応力範囲 ( $\Delta\sigma$ )	62 MPa(0.93)	117 MPa(0.89)	62 MPa (0.79)	
	疲労許容応力範囲	67 MPa(1.00)	132 MPa(1.00)	78 MPa (1.00)	
	100年間の繰り返し回数(N)	同右	同右	在来線：90本・往復/日 新幹線：14本・往復/日 104×2×365×100 = 760万本【1.00】	
実計測	貨物列車	荷重編成	貨物列車 1+20両(湧歌(下)+マリンライナー5両(上))	貨物列車 1+20両 (計測機を貨物濃載に換算)	貨物列車 1+22両
		荷重	貨1900+(マ7)218=1118 t[1.04]	900 ton[0.64]	968 ton[0.70]
		最大応力範囲 ( $\Delta\sigma$ )	55 MPa(0.82)	36 MPa(0.31)	11 MPa(0.14)
		100年間の繰り返し回数	同右	同右	8本・片道/日×365×100 = 29万本【0.04】
	旅客列車	荷重編成	5両(マリンライナー)	5両(特急しおかぜ)	5両(マリンライナー)
		荷重	218 ton[0.20]	197 ton[0.14]	218 ton[0.16]
		最大応力範囲 ( $\Delta\sigma$ )	25 MPa(0.37)	16 MPa(0.12)	9 MPa(0.12)
		100年間の繰り返し回数(N)	同右	同右	143本・片道/日×365×100 = 522万本【0.69】
疲労寿命(修正マイナー則)		700年	8,000年	29,700年	

### 3.3 溶接きずの調査方法

許容きず（溶接欠陥）の進展については、AUTに代わる手法として、フェイズドアレイ探傷により、精度よく追跡調査が可能であることを室内試験により確認した。

### 3.4 今後の調査

瀬戸大橋において応力計測を行い、現状の疲労環境を調査した結果、これまでの知見と同様、疲労安全性を有することを確認した。

今後、現状の列車運行編成及び本数が大幅に変更された場合などには、今回実施したひずみゲージを使った応力計測により、疲労環境等を把握することにする。

また、溶接きずの進展状況の調査が必要な場合には、フェイズドアレイ探傷により行うこととする。

## 4. 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

### 4.1 経緯

2.1 で示したように、鋼床版における輪荷重直下のデッキとUリブ溶接部のルート部から発生、ビード内を進展し、ビードを貫通する亀裂 (図-1) について、低コストかつ効率的に検出できる非破壊検査法として、亀裂の断熱効果により生じる温度差 (温度ギャップ) を赤外線サーモグラフィを用いて検知することで、亀裂を検出する温度ギャップ法を神戸大学との共同研究において開発、点検システムを実用化し<sup>2)3)</sup>、現在、瀬戸大橋及び大鳴門橋で点検を実施しているところである。

このビード内を進展する亀裂は貫通する前は溶接に内在する非貫通亀裂として存在する。また、貫通部の両端においても非貫通部が存在する (図-1)。

予防保全の観点からは、非貫通亀裂を含めた早期検出が有意であることから、温度ギャップ法を用いた、非貫通亀裂の検出について検討を行ってきた。

過去の研究では、ビード亀裂非貫通部の検出性の検討で、実橋の2つの亀裂に対して温度計測と形状調査を行い、亀裂ごとに非貫通部の長さや形状は異なること、非貫通部の“デッキからUリブ方向の温度勾配”と残存のど厚の分布を比較により残存のど厚が薄い部分ほど高い温度勾配であることを確認した<sup>7)</sup>。また、平板に非貫通亀裂を模擬したスリット試験片やその試験片をモデル化した有限要素法による定常熱伝導解析により、温度ギャップ法で非貫通亀裂検出の可能性を確認している<sup>8)</sup>。

令和2年度は、平板の楕円状の非貫通亀裂を対象に、有限要素法による定常熱伝導解析と試験体実験の結果を比較することにより、より精度よく亀裂の形状を推定する方法を検討した。

### 4.2 検討内容

今回検討を行った亀裂形状評価法<sup>9)</sup>の概要は以下のとおりである。

亀裂長さ $2a$ と亀裂深さ $d$ の半楕円亀裂を放電加工によるスリットで模擬した試験体に対して、まず、図-3に示す実験により半楕円亀裂の裏面側の温度分布を赤外線カメラにより測定し、亀裂付近の観測点(1)、(2)における $x$ 方向温度勾配値を得る。次に、実験条件を反映し亀裂長さ $2a$ と亀裂深さ $d$ を様々に変化した数値解析を有限要素法により実施し、それぞれの観測点で実測された温度勾配値となるような亀裂長さ $2a$ と亀裂深さ $d$ の組合せ特性線を抽出する。最後に、それらの組合せ特性線の交点から亀裂長さ $2a$ と亀裂深さ $d$ を同定する (図-4)。

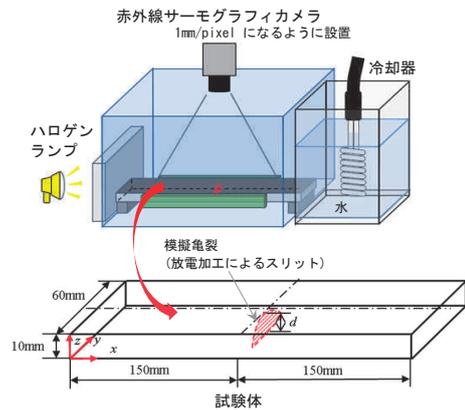


図-3 実験装置及び試験体

Fig. 3 Experimental equipment and specimen

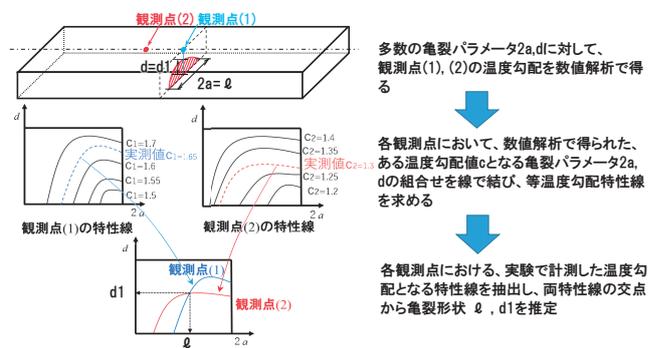


図-4 亀裂形状推定方法

Fig. 4 Method of estimating crack shape

試験体の実験結果に基づく推定結果を表-2に示す。亀裂長さは誤差15%以内、亀裂深さは誤差10%以内でそれぞれ推定を行うことができた。また、亀裂深さが浅いと亀裂深さの推定精度が悪くなる傾向が得られたが、これは亀裂深さが浅いと亀裂による断熱効果が小さくなることで亀裂部周辺の温度勾配値(温度ギャップ)が小さくなり、赤外線カメラの測定ノイズ等の測定誤差の影響を受けやすいためと考えられる。

表-2 亀裂形状推定結果

Table 2 Estimated crack shape

試験体No.	亀裂長さ $2a$			亀裂深さ $d$		
	導入亀裂 (mm)	推定値 (mm)	誤差率 (%)	導入亀裂 (mm)	推定値 (mm)	誤差率 (%)
1	30.1	30.41	1.03	9	9.113	1.26
2	30.1	27.41	8.94	7	6.530	6.71
3	30.1	27.98	7.04	6	6.437	7.28
4	45.0	51.35	14.11	9	9.001	0.01

### 4.3 考察

亀裂を模擬したスリットを有する平板試験体に対して、多数の解析結果から導かれる、亀裂形状と温度勾配値の関係をを用いることで亀裂形状を推定できることを確認し

た。しかし、実橋においては、溶接部の詳細構造（余盛り形状、Uリブへの溶け込み量、溶接ルート形状、デッキとUリブ内側の接触状況等）が着目箇所ごとに異なり、亀裂の状態（亀裂形状、開口幅等）も個々に異なる。実橋における非貫通亀裂箇所のデッキ側からUリブ側への熱伝導はこれらの複雑な要因によって左右されるため、温度ギャップ法により定量的に非貫通亀裂を検出することは困難であると判断される。

## 5. 鋼主桁疲労安全性評価法に関する検討

### 5.1 経緯

鋼床版桁は多数の鋼板を溶接で接合した溶接集成構造であり、通行する大型車の輪荷重の影響を大きく受けるため、疲労に着目した点検対象箇所が多い。この鋼床版桁を合理的に点検及び診断するためには各溶接継手の累積疲労損傷度を考慮した点検箇所の絞り込みが必要である。ここでは、瀬戸大橋吊橋補剛桁（トラス桁）上部に位置する道路桁である鋼床版I桁（図-5）を対象に、北備讃瀬戸大橋における応力測定、その結果から算出した疲労損傷度及び瀬戸大橋の交通量実態に対し、鋼道路橋の疲労設計指針<sup>10)</sup>に基づく疲労照査の結果を検証することにより、疲労点検重点箇所を整理した成果の概要を述べる。

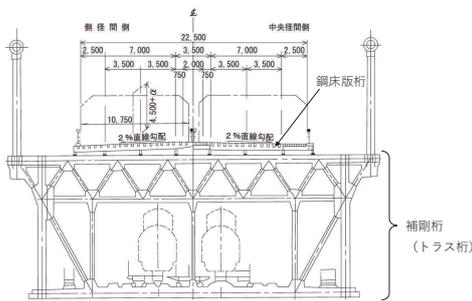


図-5 吊橋補剛桁断面

Fig.5 Cross-section of suspension bridge girder

### 5.2 応力計測

北備讃瀬戸大橋格点 21-22 (BB2P 部) を含む鋼床版桁において疲労損傷度が高いと想定される部位に対し、72時間の応力頻度測定および荷重車（散水車）走行時の応力測定を平成31年1月22日～1月25日に実施した。測定位置を図-6に示す。72時間応力計測による重量車の交通量比は、走行車線：追越車線＝9：1であった。

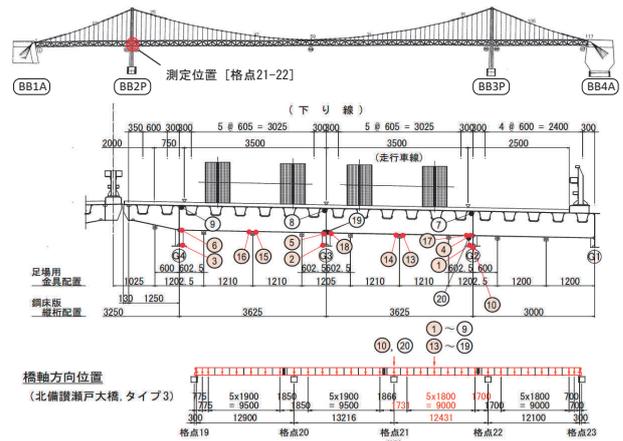


図-6 応力測定位置（北備讃瀬戸大橋）

Fig.6 Measured position (Kita Bisan-seto Bridge)

### 5.3 鋼道路橋の疲労設計指針に基づく照査

応力測定箇所に対応する鋼床版I桁の格子解析モデルを作成し、疲労照査荷重1組（T荷重:200kN）による断面力波形を算出し、溶接継手の各位置の主桁作用による公称応力としての応力波形を求めて疲労設計指針に基づく疲労照査を行った。大型車の車線別の交通量比は、応力計測結果から得られた、走行車線：追越車線＝9：1を用いた。

解析により算出した応力を基にした累積疲労損傷度を72時間応力計測で得られたデータから算出した累積疲労損傷度と合わせて表-3に示す。累積疲労損傷度 $D_{2018}$ は、2018年度の日大型車交通量2,420台/(日・方向)が100年間継続した場合の値を示し、この値が1を超えると疲労寿命を超えていることを意味する。疲労設計指針に基づき解析値より累積疲労損傷度を算出する場合は、“大型車交通量”を“疲労設計荷重（T荷重）の載荷頻度”に変換するための係数である頻度補正係数を0.06とするが、その結果は表-3に示すとおり、ほぼ全ての溶接部で1を超えている。これらの値は、72時間応力計測から算出した累積疲労損傷度を、安全側の評価として打ち切り限界以下の応力範囲も考慮する修正マイナー則で算出した結果に対して大きく乖離している。また、解析値を用いた算出において頻度補正係数を指針に示された値の1/10である0.006としても、応力測定結果から算出した累積疲労損傷度に対して安全側に評価できることがわかる。このことは、疲労設計指針で前提としている車重分布が直轄道路の重交通路線のものであり、瀬戸大橋を走行する車両の車重分布が直轄道路に比べてマイルドであること、つまり過積載車両が少ないことを意味する。

表-3 鋼床版桁の累積疲労損傷度  
Table 3 Accumulated fatigue damage degree

位置	位置 No.	疲労強度等級	100年間の累積疲労損傷度 $D_{2018}$				
			72hr応力計測より算定		格子解析 (疲労調査荷重(T荷重)載荷)		
			疲労指針による 方法(打ち切り 限界考慮)	修正マイナー則	疲労指針による 方法(傾度補正 係数=0.06)	傾度補正係数 を0.006とした 場合	
主桁下フランジ 後期中央部	G2	①	E	0.01	0.33	7.06	0.71
	G3	②	E	0.04	0.48	8.14	0.81
主桁ウェブ ガセット位置 後期中央部	G4	③	E	0.01	0.07	1.14	0.11
	G2	④	G	0.15	0.48	7.83	0.78
主桁下フランジ 中間支点部	G3	⑤	G	0.05	0.35	6.84	0.68
	G4	⑥	G	0.06	0.12	0.61	0.06
横リブ下フランジ 吊金具付近 後期中央部	G2	⑦	G	0.09	0.28	3.46	0.35
	G2-G3間(G2側)	⑧	F	0.49	0.84	15.38	1.54
横リブ下フランジ 垂直補剛材付近 後期中央部	G2-G3間(G3側)	⑨	F	0.53	0.88	15.38	1.54
	G3-G4間(G3側)	⑩	F	0.02	0.06	1.18	0.12
	G3-G4間(G4側)	⑪	F	0.01	0.05	1.18	0.12
垂直補剛材コバ面 中間支点部	G2-G3間(G2側)	⑫	F	0.00	0.08	1.01	0.10
	G2-G3間(G3側)	⑬	F	0.00	0.09	1.41	0.14
				11.00	11.85	-	-

#### 5.4 疲労点検重点箇所の整理及び考察

瀬戸大橋の交通実態を考慮した解析結果及び72時間応力計測結果を基に、鋼床版桁の桁部材の疲労点検重点箇所の整理を行った。

表-3に示されるとおり、格子解析による評価では、走行車線の“横リブ下フランジの吊金具の溶接部”，72時間応力計測による評価では“横リブ下フランジと垂直補剛材の溶接部”の疲労環境が厳しいことが確認できる。当面は図-7に示す、これらの溶接部の点検を重点的に行うことが求められる。

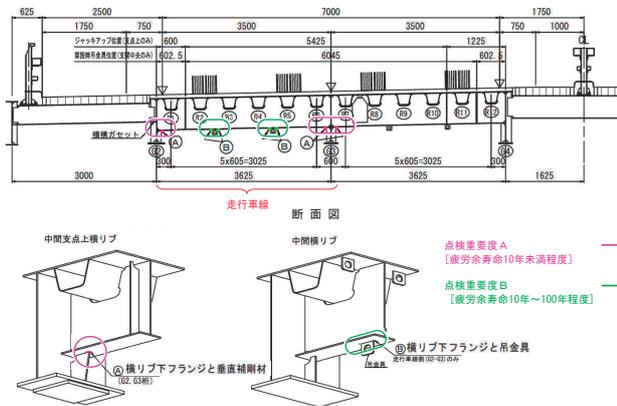


図-7 疲労点検重点箇所

Fig.7 Focused position on fatigue inspection

### 6. 疲労専門業務の効率的な実施

#### 6.1 経緯

疲労に関する技術の向上と確実な技術の継承を図るため、疲労対策チームとして、非破壊検査や応力測定等に取り組み、疲労亀裂の判定、進展性の評価等の専門的業務を集約して実施している。

門崎高架橋における鋼床版デッキ-Uリブ溶接部ビード貫通亀裂(図-1)の進展調査を平成23年度より実施しており、令和2年度末時点で29箇所の亀裂が確認されている。この亀裂は、Uリブを切断する方向に進展すると耐荷力の喪失につながり、デッキ側に進展すると路面の変状による第三者被害につながるため、そのような状態になる前に補修する必要がある。鋼床版の製作手順、溶接条件等で溶接内残留引張応力は一様でなく、個々の亀裂の進展傾向は異なるため一概には言えないが、亀裂が長くなるとデッキ側又はUリブ側へ屈曲して進展する恐れがあることから、補修の目安を亀裂長さ250mm以上としている。確認された亀裂のうち15箇所については、写真-1のようにTRSを用いた下面からの当て板補修<sup>1)</sup>を実施済みである。令和2年度に実施した亀裂調査について述べる。

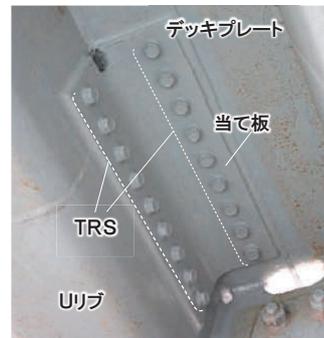


写真-1 当て板補修

Photo.1 Cover plate repairing

#### 6.2 亀裂調査及び考察

令和2年度は、これまでの調査と同様に、全亀裂について進展調査を実施した。亀裂の進展状況を図-8に示す。補修目安としている長さ250mmに達している亀裂は現時点で存在しないが、注視すべき亀裂を図-8では強調して表示している。亀裂①②は、進展速度が50mm/年程度と比較的速いことから今後の進展に注視する必要がある。亀裂③は先端が屈曲しており(写真-2)、今後Uリブへと進展する可能性が高いため、母材へ進展する前にストップホールを施工することが望ましい。

また、亀裂長ささと亀裂進展速度の関係を図-9に示す。この図より両者に相関がないことが確認できる。これは、ビード貫通亀裂の進展予測は困難で、個々の亀裂について経過観察が重要であることを示している。

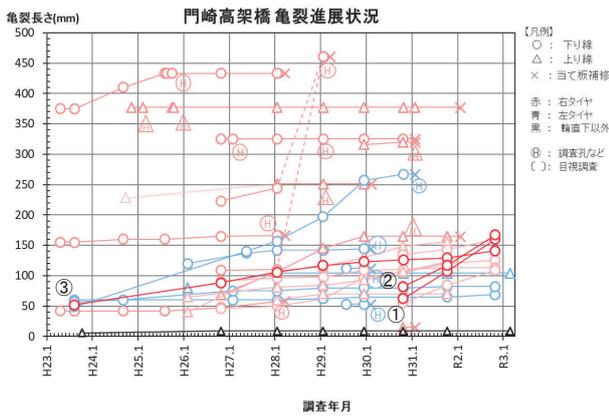


図-8 疲労亀裂進展状況

Fig.8 Propagation of fatigue crack

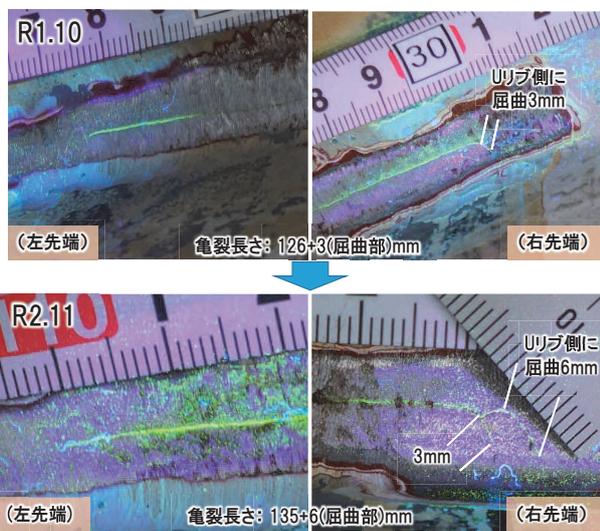


写真-2 疲労亀裂進展状況(亀裂③)

Photo 2 Propagation of fatigue crack (crack③)

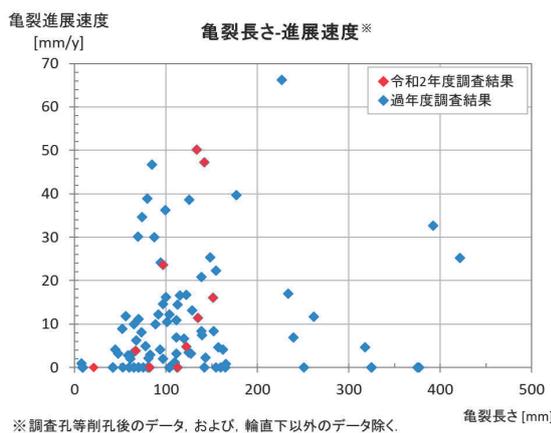


図-9 亀裂長さとの進展速度

Fig.9 Crack length and propagation speed

## 7. まとめ

直轄の重交通路線や都市高速等では、走行する大型車両の積載重量や台数が多く、鋼橋の部材、特に鋼床版の疲労損傷が多数発生し問題となっている。幸いにも本四道路は、それらの路線と比べて疲労環境が厳しくないことから、一部の橋梁のみに疲労亀裂が確認されている程度である。しかし、疲労亀裂は、大型車荷重等による繰り返し荷重によるダメージが蓄積されると発生し、放置し進展すると、補修の難易度が高くなること、橋梁の耐力に影響を及ぼす場合があることから、点検による早期発見及び補修が極めて重要であり、今後も点検・補修技術の開発を進める必要がある。

## 参考文献

- 1) 土木学会：鋼床版の疲労(2010年改訂版)，2010.12.
- 2) 溝上善昭，小林義弘，和泉遊以，阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版デッキプレート-Uリブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出，鋼構造論文集，第22号第87号，pp.47-56，2015.9
- 3) 溝上善昭，奥村淳弘，大藤時秀，和泉遊以，阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ法によるUリブ鋼床版のビード貫通亀裂の自動検出と装置開発，構造工学論文集，Vol.64A，pp.573-582，2018.3
- 4) 石山四郎，岩屋勝司，吉澤光男，梶本勝也，八島実：瀬戸大橋溶接部の非破壊検査システム，橋梁と基礎，pp.33-39，1992.1
- 5) 森山彰，横井芳輝，田向和則：本四連絡橋の疲労設計，本四技報，Vol.32，No.110，pp.57-61，2008.3
- 6) 日本道路協会：鋼道路橋疲労設計便覧，pp.115-119，2020.9
- 7) 奥村ら：温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法によるビード亀裂非貫通部の検出，第72回土木学会年次学術講演会講演論文集，I-155，pp.309-310，2018.8
- 8) 和泉遊以，溝上善昭，上西広粹，阪上隆英，林昌弘：温度ギャップ法によるビード非貫通亀裂の検出に関する基礎的研究，構造工学論文集A，Vol.66A，pp.540-548，2020.3
- 9) 佐賀ら：温度ギャップ法による非貫通亀裂の形状評価に関する研究，第76回土木学会年次学術講演会講演論文集（投稿中）
- 10) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002.3
- 11) 本四高速 長大橋技術センター：鋼床版デッキプレート-Uリブ溶接部ビード貫通亀裂に対するTRSを用いた下面からの補修工法\_施工マニュアル(案)，2021.3

## 耐震分科会の取組

Report of Seismic Subcommittee

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

長大橋・技術部  
次長 兼 総括・耐震・耐風グループリーダー

金田 崇男 Takao Kaneda

長大橋・技術部  
総括・耐震・耐風グループサブリーダー

## 1. 検討目的及び経緯

保全技術交流会議 耐震分科会では、長大橋技術センター（現 長大橋・技術部）を中心に、保全部、管理センターが一体となり、橋梁の耐震性能照査、耐震補強設計、施工計画の立案等を実施している。

代替路のない海峡部直近IC間については、明石海峡大橋区間及び大鳴門橋区間を平成28年度に、瀬戸大橋区間を令和2年度に耐震補強工事を完了している。

現在は、平成25年度から着手した西瀬戸自動車道の長大橋耐震検討を進めており、令和2年度は因島大橋の耐震補強設計に着手した。今後は、因島大橋の耐震補強設計を令和3年度に、来島海峡大橋の耐震性能照査・補強設計を令和5年度に完了させる計画である。

また、陸上部橋梁については、令和3年度末までに耐震補強が必要な橋梁は、ほぼ計画どおり耐震補強設計を完了させており、令和2年度は、令和8年度末までに耐震補強が必要な橋梁のうち、対象橋梁の多い神戸管理センター管轄内を先行し耐震性能照査・補強設計に着手した。

ここでは令和2年度に耐震補強設計に着手した因島大橋について簡単な設計概要を紹介する。

## 2. 解析手法と解析モデル

解析手法や解析モデルの考え方はこれまでの長大橋の耐震補強設計の考え方を踏襲している。

各基礎底面における有効入力地震動を求め、3方向同時入力による地震応答解析を基本として耐震性能照査・補強設計を実施した。

モデル化については、できるかぎり解析精度を高めることを念頭に、材料非線形性や幾何学的非線形性を忠実に再現できるファイバー要素などを適用した。また、ファイバー要素等の梁要素ではモデル化が難しい構造部材についてはFEM解析を行い、その結果を耐震補強設計に反映させた。

補剛桁や主塔などの鋼部材は、道路橋示方書に従い、断面照査及び座屈安定照査により、降伏又は座屈が生じないことを、支承類は支承反力によって支承を構成する部材が降伏耐力に達していないことを照査した。加えて支

承の変位や桁端部の移動量が許容値を超えないことも照査した。

## 3. 因島大橋の耐震補強設計

因島大橋（吊橋、橋長:1270m、中央支間長:770m）の耐震性能照査では、側径間側の一部のトラス部材の損傷、ウインド杓・ウインドタンク・エンドリンク・エンドストッパーが損傷する結果になった。これに対して、耐震補強設計において、リンク杓、ウインド杓、道路桁支承など支承部の耐力や許容変位を見直したうえで耐震性能照査を行い、例えば、道路桁支承については、中央径間の損傷箇所は大幅に減ったものの、側径間は損傷箇所が残る結果となった。

耐震補強検討については、当て板補強等で損傷箇所を補強する案、エンドストッパー増設案、制震ダンパー設置案の比較検討を行った。エンドストッパー増設案については、地震時の衝突により端横トラス下弦材の損傷程度が著しく大きく、補強設計が成立しないことがわかった。そこで、経済性・施工性に優れる桁端部に制震ダンパーを設置する案について、制震ダンパーが機能しなかった場合も想定し、耐震補強検討を進めている。

## 4. まとめ

これまで進めてきた海峡部長大橋の耐震補強設計は、残すところ因島大橋、来島海峡大橋のみとなっており、現在、因島大橋の耐震補強設計に着手している。また、発生確率26%未満の地域にある橋梁については、令和2年度より、神戸管理センター管轄内の陸上部橋梁の耐震検討に着手しており、鋼アーチ橋等の耐震性能照査・補強設計を進めている。

引き続き、これまで蓄積してきた知見を生かし、合理的な耐震補強設計を行うと共に、着実な耐震補強の進捗を図る予定である。

# 舗装分科会の取組

Report of Pavement Subcommittee

村上 博基 Hiroki Murakami

保全部 道路保全課長

中山 義雄 Yoshio Nakayama

鳴門管理センター 工事課 エキスパート  
(前) 保全部 道路保全課長代理

## 1. 検討目的及び経緯

保全技術交流会議の舗装分科会では、1)鋼床版舗装非破壊評価検討、2)効率的な舗装維持管理のための劣化予測等、3)コンクリート舗装評価方法検討について取り組んできた。

本稿は、舗装分科会において令和2年度に実施した検討概要を報告するものである。

## 2. 検討内容

### 2.1 鋼床版舗装非破壊評価検討

近年、表層切削前に目視では確認できないグースアスファルトの劣化や鋼床版表面のさびなどの局所的な変状が表層切削時に確認されており、材料や施工機械等、事前の準備が必要なグースアスファルトの補修を困難にしている。これらの局所的なグースアスファルトの変状に対して、施工性、経済性に優れる補修方法を確立することを目的とした検討を行い、局部補修材料として使用が推奨される材料を使用しての補修手順や留意事項等について、現場施工の際の手引書として「グースアスファルト舗装の局部補修手引書<sup>1)</sup>」を令和元年度に取りまとめたところである。

また、これらの劣化は表層を切削しても変状が確認できない場合があり、更にグースアスファルトの変状が進展する可能性もあるため、表層切削前にグースアスファルトの劣化状況・範囲を事前に把握出来る非破壊検査手法の確立が望まれていたところである。そこで、PC床版等で実績のある地中レーダーを用いた非破壊検査により、表層切削前にグースアスファルトの劣化状況や範囲を事前に把握できる手法について検討を行った。具体的には、画像解析による面的なスクリーニングとマイクロ波の反射波形から時間一周波数分析を組み合わせて行う手法で分析することとした(図-1)。昨年度までの検討の結果、分析結果と舗装改良時の開削状況との比較を行ない、劣化状況や範囲については、当該検査手法により把握できることを確認した。<sup>2)</sup> 今後の課題と展望として、分析に時間を要することや橋梁ごとで周波数レベルが異なる場合があること等のため、データ蓄積を行い、

橋梁ごとの特性に応じた劣化判定閾値の精度向上に取り組みたいと考えている。

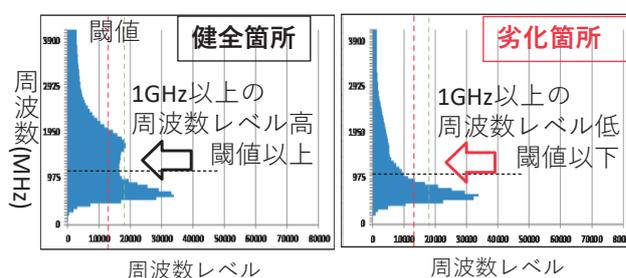


図-1 地中レーダー計測で得た反射波形の時間-周波数分析

Fig.1 Time-frequency analysis of reflected microwave signal

### 2.2 舗装劣化予測手法の検討及びコンクリート舗装評価方法検討

アスファルト舗装の保全においては、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JBPMs(舗装マネジメントシステム)を導入しており、令和元年度に実施した路面性状調査結果を取り入れ、予測式の最適化を図ったところである。今後も、劣化予測式への反映等の精度向上についての検討を継続していく予定である。

一方、コンクリート舗装の保全を的確に行うため、主な変状である目地部の角欠け、段差等の補修方法に用いられているパッチング工法等について現地で試験施工を実施しており、その評価方法等の検討を行う予定である。

### 参考文献

- 1) 中山義雄, 梶尾光邦: グースアスファルト舗装局部補修の推奨仕様, 本四技報, Vol.44, No.134, pp.27-33, 2020.3
- 2) 梶尾光邦, 森田英明, 太田雅彦: 非破壊検査手法を活用した鋼床版舗装の劣化度評価, 本四技報, Vol.45, No.136, pp.25-30, 2021.3

# 点検分科会点検技術WGの取組

Report of Working Group for Inspection Technology, Inspection Subcommittee

西谷 雅弘 Masahiro Nishitani

長大橋・技術部 次長  
(兼) 総括・耐震・耐風グループリーダー  
(前) 長大橋技術センター 次長  
(兼) 診断・構造グループリーダー

有馬 敬育 Noriyasu Arima

長大橋・技術部 技術革新・アセット  
マネジメントグループ エキスパート  
(診断・構造担当)  
(前) 長大橋技術センター 診断・構  
造グループサブリーダー

金田 崇男 Takao Kaneda

長大橋・技術部 総括・耐震・  
耐風グループサブリーダー  
(前) 長大橋技術センター 総  
括・耐震グループサブリーダー

内野 隆太郎 Ryutaro Uchino

長大橋・技術部 技術革新・アセットマ  
ネジメントグループ  
(前) 長大橋技術センター 診断・構造  
グループ

## 1. 検討目的及び経緯

本州四国連絡高速道路の道路構造物をより効率的に維持管理するためには、より高度な点検・診断技術の開発が必要不可欠である。そこで、保全技術交流会議点検分科会点検技術WGでは、近接目視困難箇所の点検手法や近赤外線等の新技術を用いた点検手法などについて検討を実施してきた。

本文は、点検分科会点検技術WGにおいて、令和2年度に実施した下記技術開発項目について、その概要を報告するものである。いずれも、令和2年度からの第4期技術開発計画の技術開発項目である。

- ・光学計測による部材表面の劣化評価に関する検討
- ・近接目視困難箇所の点検手法の検討
- ・新たな点検手法の開発
- ・定期点検の省力化・信頼性向上

## 2 光学計測による部材表面の劣化評価に関する検討

### 2.1 経緯

長大橋の維持管理費において、塗替塗装に要する費用は大きな割合を占めている。塗替塗装は、下塗りが露出する前に完了させる方針であり、上塗りの損耗速度を正確に把握することが塗替開始時期を決定するうえで重要となる。しかし上塗りと中塗りの塗色はよく似ているため上塗りの損耗程度の判定が目視では困難な場合が多い。

一方で、重防食塗装に赤外線が入射したときの反射、吸収、透過の分光情報は、上塗り（ふっ素樹脂塗料）と中塗り（エポキシ樹脂塗料）によって異なる。また、近赤外線カメラによって計測できる塗膜の反射エネルギーは、上塗りの厚さに応じて変化する。これらのことから、塗膜の分光特性の違いに着目した、部材表面の塗膜劣化評価に関する共同研究<sup>1) 2)</sup>を平成29年度より神戸大学と実施している。

平成29年度の検討では、感度波長帯900~1,700nmの近赤外線カメラに、1,400nm以上の波長帯を透過するLPフィルタを装着し、大三島橋のアーチリブを撮影した結果、写真-1に示すように赤外線画像から、上塗りの損

耗を肉眼で見るより鮮明かつ面的に捉えられることを確認した<sup>2)</sup>。

平成30年度の検討では、写真-2に示すような塗り分け試験体を用いて、赤外線画像から計測した輝度値と、微破壊試験によって測定した上塗り膜厚の関係性を求めた結果、塗料メーカー及び塗料成分により反射・吸光特性が異なるものの、ほぼ線形の関係が見られたことから、赤外線画像から上塗り膜厚を推定できる可能性があることを確認した<sup>3)</sup>。そこで写真-3に示すように、供用後全面塗替をしていない多々羅大橋塔基部の表面の撮影と微破壊試験、及びその近傍に貼り付けた塗り分け試験体の撮影を行い、塗り分け試験体の輝度値と上塗り膜厚の関係から得られた較正曲線を指標として、塔部材面の輝度値から上塗り膜厚の推定を試みた結果、微破壊試験による測定結果と大きく乖離した。このことから試験体の新規塗膜と実橋の劣化した塗膜では、白亜化等の影響で分光特性が異なることや、同じ会社の同じ塗装系でも、年代により塗料成分が異なることが想定される。また実橋では、日射や間接光等の外乱要素の影響が大きいため、こうした影響を取り除くことの重要性を確認した。

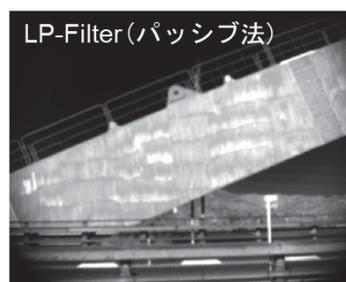


写真-1 アーチリブの赤外線画像  
Photo 1 Infrared image of arch rib

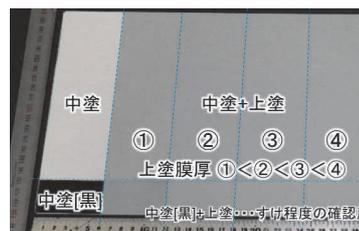


写真-2 塗り分け試験体の例

Photo 2 Test piece coated by different surface coat thicknesses

令和元年度の検討では、外乱要素の影響を取り除くため、アクティブ照明として、撮影範囲を均一に照射できる、モノブロックストロボを使用して赤外線光を照射し、照射しているときの画像輝度値から照射していないときの画像輝度値を差し引いた“差分画像”から照射による変動分のみの赤外線強度を取得する“差分処理”を用いた、アクティブ計測<sup>4)</sup>及び微破壊試験を、写真-4に示すように因島大橋1A-2P間の補剛桁主構トラス下弦材ウェブ面にて行った。写真-5に自然光下のトラス部材の赤外線画像を示す。写真-5(a)は差分処理前、写真-5(b)は差分処理後の赤外線画像である。写真-5(a), (b)内の参照ボードは、自然光による採光状態やアクティブ照明の強度・均質性を確認する目的で設置したものである。実験の結果、外乱要素の影響が軽減されており、個々の計測箇所(同一画像内)では膜厚が大きいほど輝度比が小さい関係を確認したものの、全計測箇所(別個の画像群)のデータをまとめると膜厚と輝度比の相関を確認できなかった<sup>5)</sup>。図-1(a)に撮影された赤外線画像における参照ボードでの赤外線輝度値の時系列変化の一例を示す。これにより、モノブロックストロボ自体の発光強度は一定であるものの、発光時間が短く、赤外線カメラが発光のピークを捉え切れていないため、画像毎にアクティブ光の照射強度が異なっていたことが、全計測箇所における相関に影響したと想定される。

## 2.2 令和2年度の成果概要

令和2年度の検討では、周期的に変動する赤外線照明を計測対象に照射し、それに同期して変動する赤外線強度の振幅を計測する、アクティブ自己相関ロックイン処理(以下「ロックイン処理」という。)を用いた計測<sup>6)</sup>により、外乱要素の影響を受けない上塗り膜厚の定量評価を試みた。

アクティブ照明については、図-1(b)に示す、赤外線画像における赤外線強度輝度値の時系列変化の一例が示すように発光強度が一定でかつ、発光時間が長くカメラが発光ピークを捉えやすい、ハロゲンビデオライトを使用した。

まず室内試験で、塗り分け試験体(写真-2)に対して赤外線光を照射し撮影を行った。その際、写真-6(a)に示すように、実橋梁における外乱要素の影響を再現するため、測定対象領域の一部に別途ハロゲン光を照射し光強度のむらを作った。写真-6(b)はハロゲン光によるむらを取り除くために、点滅するアクティブ照明の下で撮影した時系列赤外線画像データにロックイン処理を行うことによって得られた相対赤外線強度分布画像(“画像内任意の点の赤外線強度変動”を“参照点の赤外線強度変動”で基準化した画像)であり、外乱要素の影響が軽減されていることがわかる。図-2(a), (b)にロックイン処理前後の試験体の相対変動輝度比と上塗り膜厚の関係を示す。これにより、アクティブ照明を用

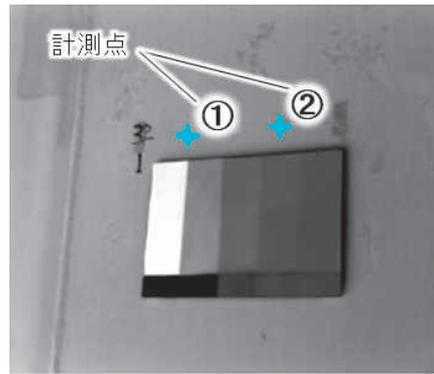


写真-3 塔基部と試験体の赤外線画像

Photo 3 Infrared image of the base of pylon and test piece (Tatara Bridge)

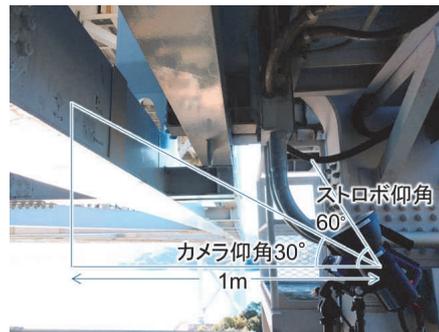
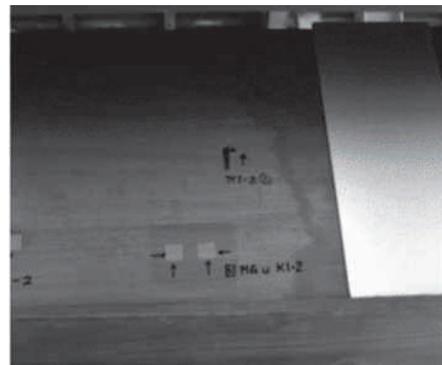
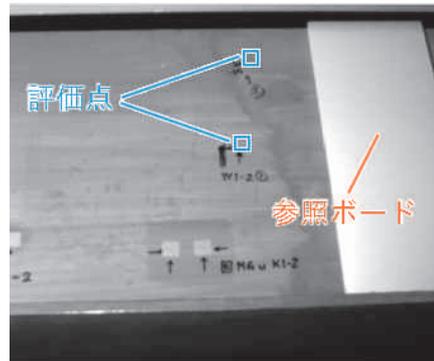


写真-4 アクティブ照明を用いた計測  
Photo 4 Measurement using active light



(a) 差分処理前  
(a) Before differential processing



(b) 差分処理後

(b) After differential processing

写真-5 自然光下のトラス部材の赤外線画像  
Photo 5 Infrared image of a member of truss girder  
(under the sun light illumination)

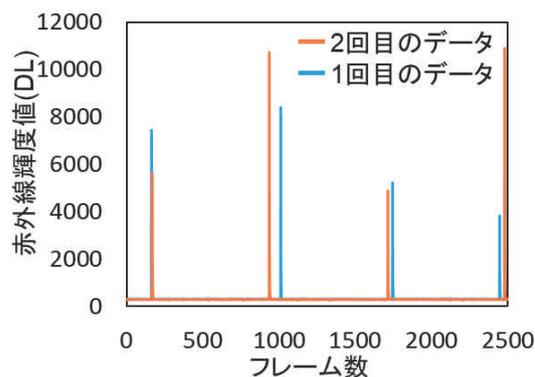
いることで外乱要素の影響を受けない塗膜劣化の定量的評価が可能であることを確認した。

次に、実橋試験として、令和元年度の測定対象と同じ因島大橋1A-2P間の補剛桁主構トラス下弦材ウェブ面において図-3に示す14箇所計測を行った。写真-7に自然光下のトラス部材の赤外線画像を示す。写真-7(a)はロックイン処理前の赤外線画像、写真-7(b)はロックイン処理を行うことによって得られた相対赤外線強度分布画像であり、室内試験と同様に、外乱要素の影響が軽減されていることがわかる。アクティブ自己相関ロックイン計測終了後、微破壊試験によって上塗り膜厚の測定を行い、相対変動輝度比と上塗り膜厚の関係を求めた結果、図-4に示すように相関を確認した。また、相対変動輝度比はチョーキング拭き取り後に計測した場合もほとんど変化がなかった。これにより、実橋梁における複数箇所（別個の画像群）の計測においても、アクティブ光の照射条件が同一かつ、アクティブ光が均一に照射されている小領域を対象とすることで、ロックイン処理により、外乱要素の影響を受けずに近赤外線計測による防食塗装の上塗り膜厚評価が可能であること、また今回計測した因島大橋補剛桁では、白亜化等による表面状態の変化が分光特性に与える影響は小さいことを確認した。

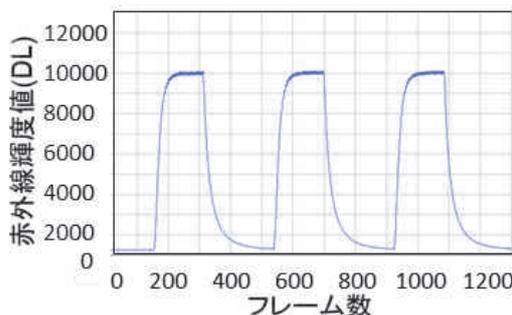
### 2.3 今後の検討

これまでの検討の結果、計測対象の塗膜に対して適切なフィルターを用いて近赤外線カメラで撮影することで、上塗り膜厚の損耗を肉眼で見るより鮮明かつ面的に捉えられることを確認した。また、塗料規格は同一でも製造メーカー、製造年代、劣化状態によって塗膜の近赤外線領域での反射、吸収、透過の分光特性が異なる可能性を確認した。アクティブ自己相関ロックイン計測では、計測対象、照明、カメラの位置関係を一定に保持する必要がある等、計測条件が煩雑であること、面的に均質な照射ができないアクティブ照明を用いる場合には赤外線画像内においてアクティブ照明の照度が均質とみなせる小領域でしか計測ができないこと、計測した相対変動輝度比と上塗り膜厚の関係を示す指標を作成するために多数の微破壊試験が必要であること等の前提があるものの、外乱要素の影響を受けない塗膜劣化の定量的評価が可能であることを確認した。

今後はこれまでの検討で得た知見を生かしつつ、近赤外線カメラを用いたハイパースペクトル計測による塗膜劣化箇所のスクリーニングや、テラヘルツ波による塗膜詳細計測法について検討を行う予定である。

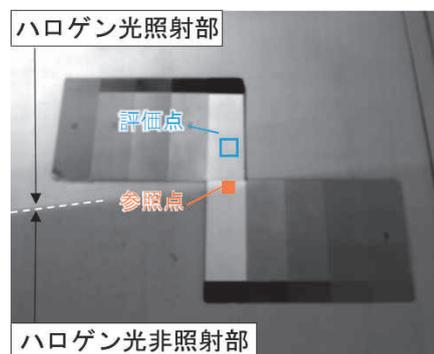


(a) モノブロックストロボ使用時  
(a) using monoblock strobe

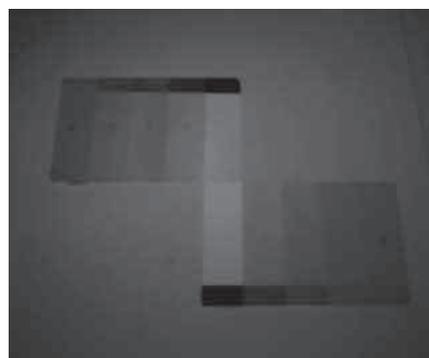


(b) ビデオライト使用時  
(b) using video light

図-1 赤外線画像内の1点における輝度値の時系列変化  
Fig. 1 Variation of intensity value at a pixel in infrared image

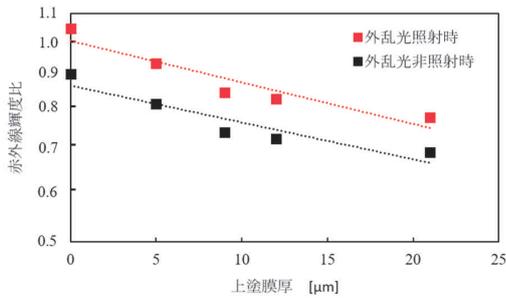


(a) ロックイン処理前  
(a) Before self-reference lock-in processing

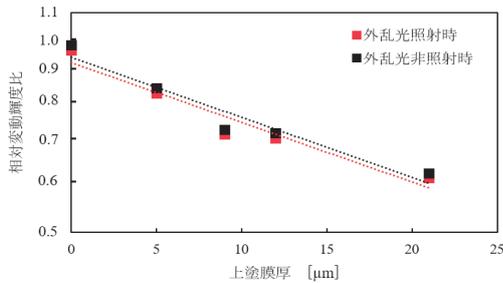


(b) ロックイン処理後  
(b) After self-reference lock-in processing

写真-6 ハロゲン光照射下の赤外線画像（試験体）  
Photo 6 Infrared image irradiated by halogen lamp (test piece)



(a) ロックイン処理前  
(a) Before self-reference lock-in processing



(b) ロックイン処理後  
(b) After self-reference lock-in processing

図-2 相対変動輝度比と上塗り膜厚の関係 (試験体)  
Fig. 2 Relation of luminance-coating thickness (test piece)

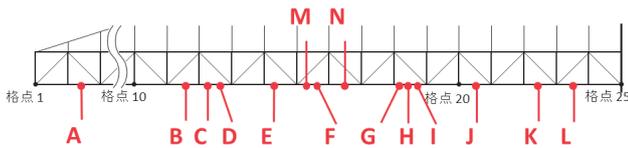
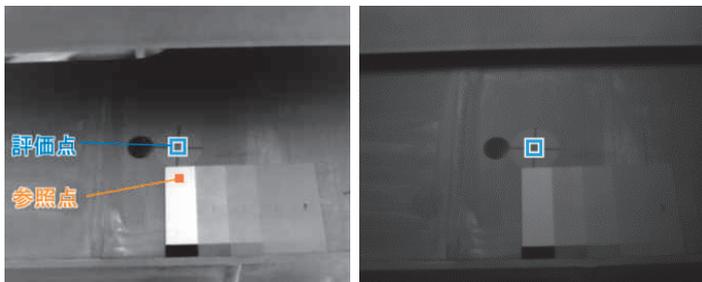


図-3 測定箇所位置

Fig. 3 Location of measuring point (Innoshima Bridge)



(a) ロックイン処理前 (b) ロックイン処理後

(a) Before self-reference lock-in processing (b) After self-reference lock-in processing  
写真-7 自然光下のトラス部材の赤外線画像

Photo 7 Infrared image of a member of truss girder (under the sun light illumination)

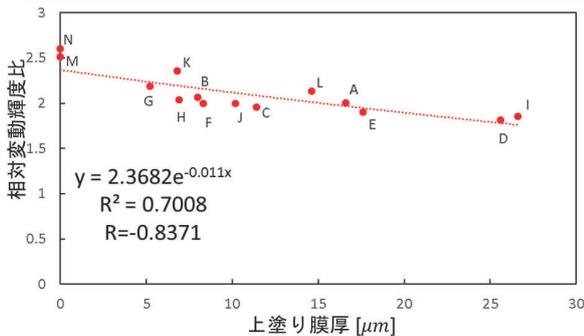


図-4 相対変動輝度比と上塗り膜厚の関係 (因島大橋)

Fig. 4 Relation of luminance-coating thickness (Innoshima Bridge)

### 3. 近接目視困難箇所の点検手法の検討

吊橋や斜張橋の塔、吊橋主ケーブルやハンガーロープ、斜張橋ケーブル、高架橋張出床版部や海峡部に隣接する高架橋などでは、橋梁点検車を用いても近接して点検することが困難な箇所がある。このような近接目視が困難な箇所において、高解像度カメラ等により撮影された画像を用いて、変状の把握や評価が可能となるよう、画像撮影手法等の検討を行い、それをとりまとめて、「高解像度カメラ使用マニュアル(案)<sup>8)</sup>」を整備することを目的として活動を実施した。

本マニュアルでは、撮影対象とする変状に応じた目標解像度(0.5~3mm/1画素)を例示するとともに、カメラの画素数、使用レンズ及び撮影距離に応じて、必要となる解像度を例示している。また、主塔や床版裏面などを対象として、撮影方法等を具体的に紹介している。本マニュアルは、現時点における経験や知見に基づいてまとめたものであり、今後、点検等における高解像度カメラの使用実態を評価、分析しながら、最新の知見等を随時取り込んで、追加、更新することとしている。

点検管理要領「第2集 長大橋梁点検(2021年4月)<sup>9)</sup>」では、これまで、近接目視が困難でやむをえない場合において、高画質カメラによる画像を用いた点検を適用できるものとしていた。今回、本マニュアルの制定及び点検管理要領への反映にあたり、「橋梁定期点検要領<sup>10)</sup>」の記載と同様、近接目視によるときと同等の変状の判定ができることと判断される場合へと適用の範囲を広げ、効率性、経済性等を考慮したうえで、近接目視が困難な場合のみに限らず、広く撮影画像の使用を適用できるようにした。なお、同要領「第1集 一般土木構造物点検(2021年4月)<sup>11)</sup>」においても、同様の適用を採用している。

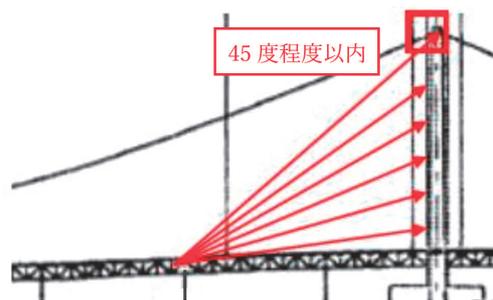


図-5 主塔の撮影方法

Fig. 5 Photographing for main tower

### 4. 新たな点検手法の開発

現技術開発計画においては、近接困難な箇所の画像取得、点検の効率化を目標として、明石海峡大橋の主塔用に開発した主塔点検ロボットの使用マニュアルを、また、既存ドローンを用いた点検の実施にあたり、安全対策に

着目した適用マニュアルを作成した。主塔点検ロボットにおいては、これまでに、明石海峡大橋主塔の外面側において、点検を実施し、その有効性を確認したところであり、また、既存ドローンを活用した点検として、因島大橋や来島海峡大橋などにおいて飛行試験等を実施し、課題の抽出やその整理等を行ってきた。

また、AIを活用した点検・診断技術として、ハンガーロープ画像診断技術及びビコンクリート打音診断技術の開発を継続するとともに、斜張橋ケーブル点検技術の開発に着手した。ハンガーロープ画像診断技術及び斜張橋ケーブル点検技術の開発は、グループ会社ブリッジ・エンジニアリングと連携して実施している。

#### 4.1 点検におけるロボット等の活用

主塔点検ロボットは、明石海峡大橋主塔の点検を実施するために製作されたものである。一方、他の吊橋や斜張橋の塔の点検への適用可能性を検討することも考えられたが、

- ・明石海峡大橋主塔の添接版の厚さとボルト高さに対応して製作されたものであるため、車輪が大きい。
- ・塔壁の広さに対応するため、横移動や斜め移動を可能とする車輪のため、規模が大きい
- ・塔の高さが低い場合には、塔頂から吊り下ろす形式の方が合理性があり、また、横移動の必要性は小さい。

などの理由から、転用して使用することを検証するより、再設計の方が望ましいと判断した。また、前述の高解像度カメラを使用して画像を取得することにより、点検は十分可能である上、撮影困難箇所はほとんどないと判断できたので、検討は実施しなかった。

明石海峡大橋主塔点検ロボットのマニュアル<sup>12)</sup>では、主塔ロボット本体の組立・基本操作を中心として、ロボットの搬出から、組立、操作、点検の実施、搬入までの流れに沿って、その取り扱い等を解説している。できる限り、初めて触れる点検員に対しても理解してもらえるように、写真・図を主体に説明を加えている。



図-6 マニュアル記載例

Fig.6 Example page of the manual

#### 4.2 ドローンを活用した点検

点検業務へのドローンの適用性については、これまで、GPSが使えない環境下における自律飛行の可能性や、主塔面やアンカレイジ壁面など自己の位置を見失う可能性のある条件下などにおいて試験飛行等を実施してきた。最近の性能が向上したドローンにおいては、点検に使用するにあたり憂慮する事象はほとんど解消され、国土交通省がとりまとめた点検に活用可能な技術として、その性能値等が紹介された「点検支援技術性能カタログ(案)<sup>14)</sup>」に多数掲載されており、機種選定にあたって、参考にすることができる。

そこで、特に、既存のドローンを点検に使用するにあたり、計画立案において考慮すること、飛行時の安全面において配慮すること等を取りまとめた「無人航空機(UAV)の点検への適用マニュアル(案)<sup>13)</sup>」を作成し、点検管理要領<sup>9)</sup>に反映した。主な内容は、下記のとおりである。

1. 点検計画、飛行計画
  - ・事前調査
  - ・飛行撮影計画の作成
    - 点検対象との距離、カメラ設定等
    - オーバーラップ率、基準点の設定等
  - ・所管航空局への個別飛行許可申請等
2. ドローンによる撮影と変状判定
  - ・事前確認
  - ・運用手順、安全対策
  - ・撮影
  - ・変状判定
3. 関係法令及び参考資料
  - ・関係法令（航空法、小型無人機等飛行禁止法、電波法、道路交通法、民法、条例等）
  - ・協議対象関係機関

#### 4.3 AIを活用した点検診断技術の検討

AIを活用したハンガーロープ画像診断技術やコンクリート打音診断技術については、実橋や実構造物への適用を行いながら開発を進め、また、斜張橋ケーブルの点検技術の開発にも着手した。

##### (1) AIを活用した画像診断技術の検討

吊橋ハンガーロープは、全長にわたっては近接が困難であり、これまで、主ケーブル上や路面上から高解像度カメラを使用して取得した画像を用いた点検を主体に実施してきた。そこで、高解像度な画像を高速撮影可能なカメラを用いて、ハンガーロープ表面全周・全長を連続撮影できる画像撮影システム(写真-8)を開発し、その適用性検証を実施してきた。

令和2年度においては、大鳴門橋(2格点8本)及び北備讃瀬戸大橋(2格点8本)のハンガーロープを対象に、画像撮影を実施した。ハンガーロープの画像は、ハンガー

ロープ1本に対し、4方向から4台のカメラを使って撮影した。写真-9は、4台のカメラで撮影した画像である。

また、画像取得とともに、非破壊検査手法(全磁束法及び渦流探傷法)を組み合わせることにより、ハンガーロープの健全性診断を合わせて実施することによって、本技術の高度化の検討にも着手している。

これまで、AIを活用した塗膜の剥がれや塗膜の割れ、錆などを自動判別する技術について、その精度向上を進めてきたが、そのためには継続した教師画像の補充が必要である。



写真-8 ハンガーロープの画像撮影システム  
Photo 8 Photographing system for suspenders



写真-9 ハンガーロープ画像  
Photo 9 Photos of suspenders taken by the system

高解像度カメラを適用したこれまでの点検では、変状の断片的な記録を蓄積することができたが、本システムの採用により、ハンガーロープ全周・全長の画像を安全かつ効率的に連続撮影できることが確認できた。今後、ハンガーロープの画像と非破壊検査の結果を組み合わせ、より定量的に健全性評価を行うことにより、予防保全の推進、維持管理コストの縮減を目標に開発を進めていく。

## (2) AIを活用した打音診断技術の検討

コンクリートの打音診断技術については、ブリッジ・エンジニアリングが令和3年度からの実用化、製品化を目指して、民間会社2社と共同開発を実施している。本技術は、特に、トンネル覆工コンクリートを対象として、検討を進めているものであり、点検作業(たたき点検)が上向き作業となる中、単純な作業ではあるが個人差が生

じたり、トンネル内走行車両の大きな走行音等の下、音を聞き分けるスキルと集中力が必要とされるなど、点検員には負担の大きな作業の一つとなっていることから、開発を進めているものである。

令和2年度は、実トンネルの点検で打音データの取得を行ったが、実トンネルでは異常部の打音データの取得が難しいことが判明したため、異常部を再現したコンクリート試験体を作成し、異常部の打音データ取得を行うことにより、本技術の精度確認を実施した。打音診断にはAI技術を活用しており、打音の周波数分析を随時実施することにより、直前・直後の打音周波数の違いを即時に判断することにより、異常箇所(周辺とは異なる音を発する箇所)を検出することができる。

本技術は、打音データをスマホに収録し、AIにより即時に分析を実施、異常の判定を直ちに行い、点検員にリアルタイムで情報提供することをシステム化することを目標としており、試験により、そのシステムの動作確認をおおむね行うことができた。また、本技術は、現時点ではトンネル覆工コンクリートの打音診断を対象としているが、他のコンクリート構造物の点検への応用についても、検討を進める予定である。

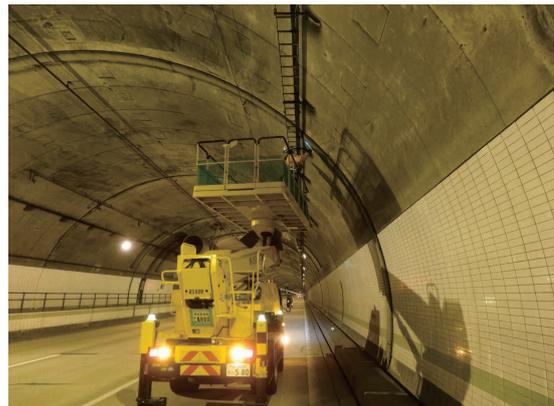


写真-10 コンクリート打音診断(通常)  
Photo 10 Hammering inspection for concrete (normal inspection)



写真-11 打音診断の試験  
Photo 11 Trial of hammering inspection

#### 4.4 斜張橋ケーブルの点検手法検討

多々羅大橋のインデント部周辺のPE管の亀裂を定量的に把握することを目的として、ハンガーロープ画像診断技術を応用することにより、詳細な画像を取得できるシステムの構築を検討している。斜張橋ケーブルは吊橋ハンガーロープより径が大きく、インデント凹部の底にある亀裂を検出する必要があるため、本システムでは、6方向から6台のカメラを使用して撮影を行うようにしている。令和2年度は、ケーブル軸の方向に人力により本システムを移動させることにより、凹部の底にある亀裂を検出できることを確認した。

斜張橋ケーブルの点検技術の開発にあたっては、AIは、PE管の亀裂の有無、亀裂の位置やパターン等の自動判別に活用するとともに、継続的に調査を実施することにより、亀裂の進展等の把握にもその活用を検討することになっている。



写真-12 斜張橋ケーブルの画像撮影システム  
Photo 12 Photographing system for stay cables



写真-13 斜張橋ケーブルの画像撮影システム  
Photo 13 Photographing system for stay cables

#### 5. 定期点検の省力化・信頼性向上

##### 5.1 背景と目的

平成26年の道路法改正により、道路橋については、全ての部材を対象に、5年に1回の近接目視を基本とする定期点検の実施と、知識と技能を有する者が評価し、橋梁の健全性の診断を実施することが義務付けられた。当社が管理する長大橋をはじめとする道路橋についても、この法改正に対応した定期点検を実施しているところである。

この定期点検の実施にあたって、平成26年6月に国土交通省が制定した道路橋定期点検要領が、第1巡目の定期点検データの蓄積や課題を反映し、第2巡目の定期点検開始前の平成31年2月に改定された。改定版では、機器等も活用した定期点検の合理化や信頼性の向上のための助言が充実された。これにより、近接での目視や定期的なメンテナンス、機器等を用いた定期的な状態把握や詳細調査、これらを補完するモニタリングを組み合わせることで、定期点検も含めた維持管理の省力化と合理化を実現することが考えられる。

特に、吊橋、斜張橋、トラス橋、アーチ橋などの特殊橋は、格点部や高所の部材を有しており近接目視作業に特に労力を要すること、また、被覆されたケーブルの内部やボルトのゆるみなど、単に近接するだけでは状態の把握が困難な部材も有することから、橋ごとに、構造の特性を考慮したうえで、定期点検の省力化と合理化を実現するために有用な特殊橋の具体的な状態把握の方法及び効果的な維持管理計画を策定する方法論の提示が期待されている。

また、これらの特殊橋は長大な場合もあり、その長寿命化のための保全計画の作成にあたっては、統計的な劣化モデルや修繕費用のモデルによるよりも、個々の橋で必要な調査を行い、データを得ることが合理的になることも考えられる。

そこで、3巡目の定期点検（令和6年度から開始）に向け、特殊橋・長大橋の定期点検方法の省力化と信頼性の向上、また、合理的な修繕計画の策定の参考となる事例を蓄積し、維持管理の手引き案を作成するため、国土交通省国土技術政策総合研究所が実施する共同研究（「特殊橋・長大橋のマネジメントに関する共同研究」、令和2年1月～令和4年3月）に、国立研究開発法人土木研究所、京都大学大学院、大阪大学大学院、東京製鋼株式会社、神鋼鋼線工業株式会社とともに参加している。

本検討テーマの成果目標は、令和4年度までに、この国の動きと連動し、3巡目の定期点検をターゲットとした長大橋定期点検の省力化・信頼性向上の手法の立案、及び本四連絡橋の定期点検要領の改定案の作成である。

## 5.2 研究計画と内容

共同研究では、特殊橋・長大橋の定期点検方法の省力化と信頼性の向上、また、合理的な修繕計画の策定の参考となる維持管理の手引き案を作成予定であり、それに向けて、以下の検討を行うこととしている。

令和2年度より、本四連絡橋を対象にこれまで行ってきた維持管理事例を再評価し、一般化、体系化することを目指し、定期点検や精密点検を整理・分析するとともに、本四連絡橋の構造特性を踏まえた定期点検を実施するため、構造、部材等に関する設計情報の収集・整理を行っている。

また、定期点検の省力化に向けて、因島大橋、多々羅大橋を対象に、橋の構造安全性の観点から、部材等の性能が構造の性能に及ぼす影響を評価し、状態把握すべき部材等を特定する方法を検討するため解析検討を行っている（詳細は本号に掲載している技術論文「ケーブル部材の状態が長大吊橋の構造安全性に及ぼす影響検討」を参照）。

令和3年度は、引き続き解析検討を行うとともに、近接目視によらない、モニタリング等を活用した橋の状態把握手法の検討を行う予定である。

また、共同研究で示される定期点検の考え方にに基づき、吊橋、アーチ橋、トラス橋（各1橋）の個別橋点検要領（案）を令和3年度に作成し、残りの本四連絡橋の個別橋点検要領（案）を令和4年度末までに作成予定である。

定期点検の信頼性向上に向けては、近接目視では状態把握できない部材（被覆ケーブルの内部、斜張橋ケーブル定着部、水中部材、埋込み部材等）への非破壊検査等について、要求性能、状態把握方法を整備することが求められる。これについては、共同研究参加機関と連携し、個別橋点検要領（案）への反映を行う予定である。

## 6. まとめ

点検技術WGでは、これまで光学計測による部材表面の劣化評価手法や近接困難箇所の点検手法、及び新たな点検手法として、主塔点検ロボットやドローンを活用した点検、AIを活用した画像診断・音響診断技術の開発、斜張橋ケーブルの点検技術の開発、また定期点検の省力化・信頼性向上に向けた検討を行ってきた。なお、点検に高解像度カメラを使用する場合、ドローン及び主塔点検ロボットを点検に適用する場合については、マニュアル案を作成することにより、これまでの検討のとりまとめを行った。残った技術開発項目については、高速道路事業高度化本部の保全業務高度化PTにおいて、引き続き、調査・研究を進める予定である。

## 参考文献

- 1) 阪上隆英, 溝上善昭, 塩澤大輝, 林昌弘, 松本悠希, 奥村淳弘: 近赤外線分光情報を用いた塗膜劣化評価法の提案, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, I-026, pp.51-52, 2018.8
- 2) 溝上善昭, 阪上隆英, 林昌弘, 塩澤大輝, 奥村淳弘, 松本悠希: 赤外線カメラを用いた塗膜劣化評価による実橋調査, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, I-027, pp.53-54, 2018.8
- 3) 松本悠希, 溝上善昭, 阪上隆英, 林昌弘, 塩澤大輝, 奥村淳弘: 近赤外線カメラを用いた重防食塗装最表層の損耗度定量評価, 土木学会第73回年次学術講演会講演概要集, I-028, pp.55-56, 2018.8
- 4) 岸上俊介, 阪上隆英, 梶房祥子, 塩澤大輝, 有馬敬育, 林昌弘, 松本悠希, 春日裕貴: アクティブ近赤外線計測による防食塗装膜の劣化評価法の開発, 土木学会第75回年次学術講演会講演概要集, VI-564, 2020.8
- 5) 林昌弘, 有馬敬育, 塩澤大輝, 阪上隆英, 梶房祥子, 松本悠希, 岸上俊介, 春日裕貴: アクティブ近赤外線計測による本州四国連絡橋の防食塗装膜の劣化評価, 土木学会第75回年次学術講演会講演概要集, VI-565, 2020.8
- 6) 坂田巧, 塩澤大輝, 有馬敬育, 阪上隆英, 内野隆太郎, 西谷雅弘, 岸上俊介, 春日裕貴: アクティブ近赤外線ロックイン計測による防食塗装膜の劣化評価法の開発, 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集 (投稿中), 2021
- 7) 有馬敬育, 内野隆太郎, 阪上隆英, 塩澤大輝, 西谷雅弘, 岸上俊介, 春日裕貴, 坂田巧: アクティブ近赤外線ロックイン計測による本州四国連絡橋の防食塗装膜の劣化評価, 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集 (投稿中), 2021
- 8) 本州四国連絡高速道路株式会社: 高解像度カメラ適用マニュアル(案), 2021.3
- 9) 本州四国連絡高速道路株式会社: 点検管理要領 第2集 長大橋梁点検, 2021.4
- 10) 国土交通省道路局: 橋梁定期点検要領, 2019.3
- 11) 本州四国連絡高速道路株式会社: 点検管理要領 第2集 長大橋梁点検, 2021.4
- 12) 本州四国連絡高速道路株式会社: 主塔点検ロボット クイックユーザーマニュアル, 2021
- 13) 無人航空機(UAV)の点検への適用マニュアル(案): 本州四国連絡高速道路株式会社, 2021.3
- 14) 国土交通省: 点検支援技術性能カタログ(案), <https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/inspection-support/>, 2020.6
- 15) 金田崇男, 山口和範, 有馬敬育: ケーブル部材の状態が長大吊橋の構造安全性に及ぼす影響検討, 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集 (投稿中), 2021
- 16) 永瀬繁幸, 金田崇男, 山口和範, 有馬敬育: ケーブル部材の状態が長大斜張橋の構造安全性に及ぼす影響検討, 土木学会第76回年次学術講演会講演概要集 (投稿中), 2021

# 点検分科会点検システムWGの取組

Report of Working Group for Inspection System ,Inspection Subcommittee

後藤 敦 Atsushi Goto

保全部  
保全企画課長

## 1. 検討目的及び経緯

保全技術交流会議点検分科会点検システムWGでは、現場での点検作業や点検結果の記録、保管、分析や活用に資するシステムを目指して、改良内容の検討を行った上で、実際に運用を行いながら既存のシステムの改良を進めてきている。

また、当社が保有する各種システムを連携させることにより使いやすいものに改善する検討も行ってきた。

本稿では、点検システムWGで行ってきた検討の内容及び昨年度までの成果と今後の予定について報告する。

## 2. 検討内容

### 2.1 点検管理システム（IRIS）の改修

点検管理システムは、点検管理要領に従って行う構造物の変状・補修の記録を登録・蓄積・検索・集計分析するために構築したシステムであり、性能向上、機能追加、ユーザビリティの改善といった改良を継続して行っている。令和2年度からは、将来的なAI技術の活用やCIM（Construction Information Modeling）、GIS（Geographic Information System）との連携を見据えた取組を行っている。具体的には、変状履歴の追跡機能拡充のためのデータ構造の見直しや、他システムとの連携等のためにシステム・人間両者の利用を想定した蓄積データのクレンジングに焦点を当てている。データ分析結果から、データ入力 of 厳密化に向け、入力要領の整備を行い点検管理要領に追加を行った。令和3年度以降については、高速道路事業高度化本部保全業務高度化部会に設けられた、アセットマネジメントシステムWGにおいて、点検、診断、補修検討、劣化予測といったアセットマネジメントの高度化に関する取組の中で、点検管理システムを含む、既存システムの活用と新たなシステム開発への取り込み等を図っていくこととしている。

### 2.2 GISを活用した他システムとの連携の検討

当社が保有する各システムが保有する各種データについて、基盤情報として位置情報を用いて連携することにより、データの統合と共有化、また可視化を図ることで相互利用可能な情報とすることを目標としている。このため、平成29年度に、路線情報共有システム（JB-GIS）を構築し、運用を開始した。また、既存のシステム（IRIS、SeSMI、HOLMES等）との連携に向けた作業を行った。今後は、2.1で記載した取組の中で、JB-GISを基盤情報システムとして位置付け、新たに開発するシステムに取り込んでいくことを目指して行く。

### 2.3 AI技術を活用した点検管理業務の高度化・効率化

日常生活の中でも使われるようになってきたAI技術について、保全業務の中での活用の可能性、具体的な活用方法の検討のため事例調査等を実施した。また、令和2年度から募集を開始した自動点検・補修技術開発コンソーシアムの中で、AI技術を活用した点検管理業務の高度化・効率化を目指した取組を始めており、具体的な活用方法等について検討を行っていくこととしている。

## 3. まとめ

当社においては、点検管理業務を含む保全業務において、作業の高度化・効率化を図るために各種システムを導入してきているが、更なる高度化・効率化を図ることが求められており、今後は、AI技術やCIM、GIS等を積極的に活用していく必要がある。そうした取組については、今後は、アセットマネジメントシステムWGにおいて行っていくこととしており、短期的、中期的に目標を設定し、着実に成果を上げていきたいと考えている。

# 耐風分科会の取組

Report of Wind-Resistance Subcommittee

竹口 昌弘 Masahiro Takeguchi 遠山 直樹 Naoki Toyama

鳴門管理センター所長  
(前)長大橋技術センター  
防食・耐風グループリーダー

長大橋・技術部  
総括・耐震・耐風グループエキスパート

## 1. 検討目的及び経緯

保全技術交流会議耐風分科会では、設計時に必要とされた耐風安定化対策についての合理的な維持管理手法検討のための耐風性再評価や、強風時におけるより安全かつ効率的な交通管理のための海峡部橋梁の路面上における強風特性調査などを行っている。令和2年度は、前年度に引き続き、因島大橋を対象に鋼床版グレーチングの閉塞の可能性についての検討を行うとともに、瀬戸大橋において、テスト車両による路面上風速の計測及び路面上に風速計を追加設置して風向風速のデータ収録を行った。これらの検討概要を報告する。

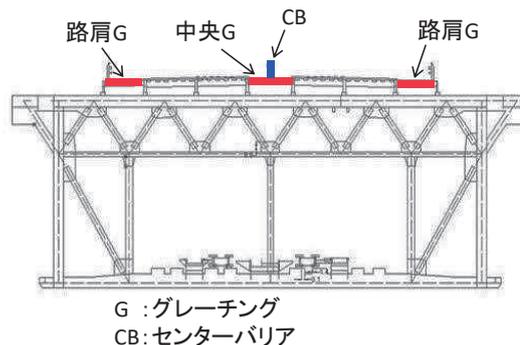


図-1 検討対象断面 (瀬戸大橋吊橋)  
Fig.1 Studied girder cross section

## 2. 鋼床版グレーチングの閉塞可能性検討

### 2.1 瀬戸大橋吊橋の検討

本四連絡橋の吊橋には、耐風安定性を確保するために路面の一部にオープングレーチング構造が採用されているが、グレーチング下への路面落下物の落下や、グレーチング直下への雨水や路面凍結防止剤の流下による腐食環境の悪化などが維持管理上の問題となっている。このため、グレーチングの閉塞可能範囲の確認とグレーチングを閉塞した場合の耐風性向上策の提案を目標に、横浜国立大学との共同研究により、風洞試験と三次元フラッター解析手法を活用して耐風安定性を照査した。

瀬戸大橋の吊橋3橋（下津井瀬戸大橋、北備讃瀬戸大橋、南備讃瀬戸大橋）では、鋼床版のグレーチング部分から路面落下物などがすり抜け、補剛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の課題がある。こういった課題の解決のために、最新の知見に基づいて、グレーチングを閉塞した場合の耐風性の再評価を平成27年度より実施している（図-1）。バネ支持風洞試験及び三次元フラッター解析による検討の結果、中央部のグレーチングは、全径間にわたり閉塞しても耐風安定性は確保されることが確認された。また、中央部と路肩部の全てのグレーチングを閉塞した場合、中央径間中央部の一部に高さ1.2mのセンターバリア（CB）を中央部の自動車防護柵に設置することで耐風安定性は確保できることが確認された（図-2）。

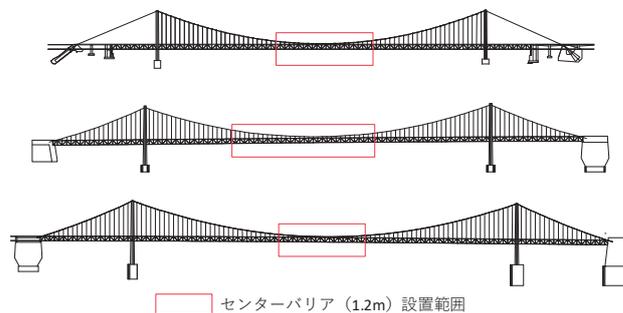


図-2 下津井瀬戸大橋（上）、北備讃瀬戸大橋（中）、南備讃瀬戸大橋（下）のセンターバリア設置範囲  
Fig.2 Required ranges of center barrier for Shimotsui-Seto Bridge (top), Kita Bisan-Seto Bridge (middle), and Minami Bisan-Seto Bridge (bottom)

### 2.2 因島大橋の検討

因島大橋では、グレーチングを通過した雨水が鋼床版支承の腐食を促進することが課題となっている。このため、瀬戸大橋吊橋で用いた手法と同様の手法でグレーチング閉塞の可能性について検討を行うこととした。検討の第一段階として、バネ支持風洞試験によりグレーチング閉塞の有無による耐風性能の確認を行った（写真-1）。風洞試験は、共同研究を実施した横浜国立大学の風洞を使用して実施した。

バネ支持風洞試験結果を図-3に示す。グレーチングを有する現状断面では、発散振動の照査風速（65.9m/s）



写真-1 因島大橋バネ支持風洞試験の状況

Photo 1 Spring-supported wind tunnel test for Innoshima Bridge

を満足するものの、中央グレーチングを閉塞した場合、さらに路肩グレーチングを閉塞した場合には、主に正迎角の耐風性が急激に悪化することが確認された。また、中央部にセンターバリアを設置した場合でも、正迎角側の耐風安定性向上の効果は小さかった（図-3の青破線）。また、三次元フラッター解析を行った結果、中央部と路肩部の全てのグレーチングを閉塞すると、中央部にセンターバリアを設置した場合においても、正迎角側において、耐風安定性を満足しないことが分かった。

### 3. 橋梁路面上の強風特性評価に関する検討

本州四国連絡橋の強風による通行止めは、過去10年間（2010年～2019年）で40回あり、自然事象による通行止め全体の約6割を占める。このような背景のもと、強

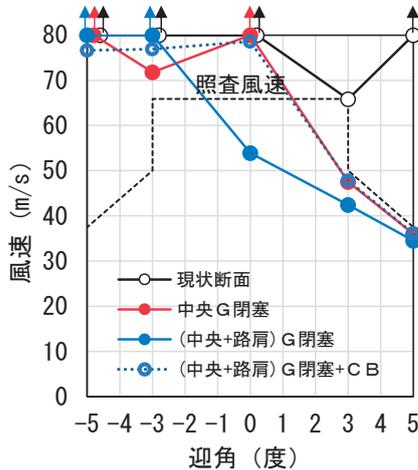


図-3 因島大橋バネ支持風洞試験結果

Fig.3 Result of spring-supported wind tunnel test for Innoshima Bridge

風時におけるより安全かつ効率的な交通規制を含めた交通管理に役立つように、瀬戸大橋を対象に海峡部橋梁の路面上における強風特性調査を、(株)本田技術研究所との共同研究で実施している。

本研究では、風速計を搭載したテスト車両を走行させて、走行車両に作用する路面上の風速を調査するとともに、交通管理用の風速計及び追加設置する風速計のデータとの関係性を分析し、橋梁路面上の強風特性を評価するもので（図-4）、これまでに、2020年1月から2021年2月までの期間の、路面上及び追加設置した風向風速計のデータを取得した。調査結果の一例として、図-5にテスト車両による瀬戸大橋路面上の風速調査例を示す。相対的に、海上部区間（吊橋、斜張橋等）では、比較的高風速で風向の変動が少ない風が記録されており、陸上部（島しょ部）ではその逆の傾向が見られる。今後、さらに取得したデータの分析を行ない、海峡部橋梁の強風時における交通管理に役立つ予定である。

### 4. まとめ

瀬戸大橋吊橋及び因島大橋を対象に、グレーチングを閉塞した場合の耐風安定性について照査を行い、瀬戸大橋吊橋については、全てのグレーチングを閉塞しても、一部区間の中央分離帯防護柵に耐風安定化部材を設置することで耐風安定性の確保が可能であることが分かった。一方、因島大橋については、全てのグレーチングを閉塞した場合、耐風安定化部材を設置しても所要の耐風安定性を満足しないことが分かった。また、瀬戸大橋の橋梁路面上の強風特性調査を行い、風向風速データの取得を行った。なお、明石海峡大橋及び多々羅大橋（斜ケーブル）において動態観測を継続しており、今後、強風が観測された場合には、風向・風速及び部材の振動についてデータ分析を行い、橋体の安全性評価等を行う予定である。

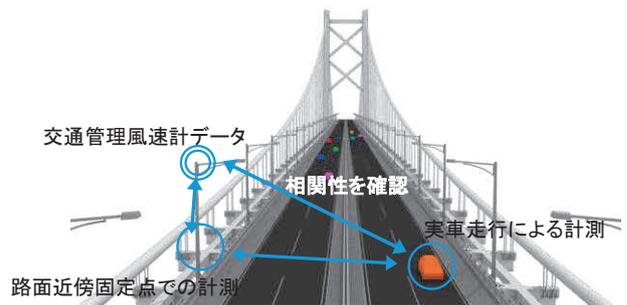


図-4 橋梁路面上の強風特性調査

Fig.4 Investigation of strong wind effects on vehicles using long-span bridges

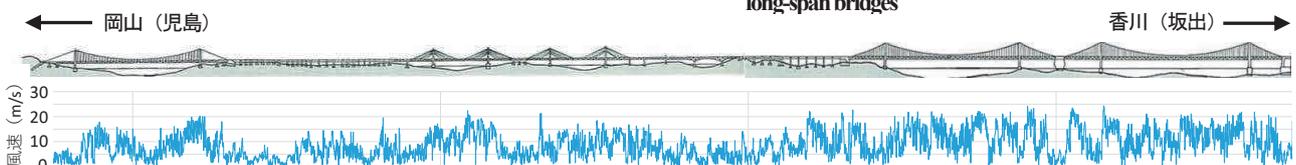


図-5 テスト車両による瀬戸大橋路面上の風速調査例

Fig.5 Wind speed recorded on Seto-Ohashi Bridges by test vehicle

## 2020年度日本機械学会関西支部賞 (技術賞) 受賞

2020 JSME Kansai branch Technique Award

2021年3月17日の日本機械学会関西支部定時総会において、「Uリブ鋼床版のビード亀裂の検査技術ならびに装置の開発」が、2020年度日本機械学会関西支部賞(技術賞)を受賞しました。

受賞した技術は、神戸大学、滋賀県立大学との共同研究で開発した、「鋼床版の亀裂検出方法および亀裂検出装置」(2016.12 特許取得)を実用化したもので、受賞者のうち代表者及び本四グループ関係者は以下のとおりです(敬称略)。

阪上 隆英 [神戸大学 教授] 【代表者】

溝上 善昭 [鳴門管理センター 工事グループ グループリーダー (受賞当時:企画部企画課)]

大藤 時秀 [(株)ブリッジ・エンジニアリング]

受賞者は、日本機械学会関西支部のホームページ内、<https://jsmekansai.org/Award/branchaward2020.pdf>に掲載されています。

関西支部賞は、「関西支部地区の機械工学と機械工業の発展に寄与した顕著な業績や貢献、ならびに関西支部地区の活動や行事における優れた成果や顕著な貢献を表彰するもの」で、そのうち技術賞は、「技術業績を通じて、関西支部地区の機械工学と機械工業の発展に貢献した個人、もしくはグループに授与されるもの」です。

受賞技術は、鋼床版のデッキプレートとUリブ間の溶接部に発生するビード進展亀裂に対し、鋼構造物の表面に現れる亀裂の温度特異場を、塗膜を剥ぐことなく、赤外線サーモグラフィにより、遠隔から非接触・非破壊で撮影するのみで亀裂を検出する「温度ギャップ法」と、亀裂を高精度かつ効率的に自動検出できる「非破壊検査システム」で構成され、既に点検に適用されています。

この技術は、安全性とコストのバランスをとり、戦略的な維持管理が求められるこれからの社会・産業インフラを支え、産業基盤と安全・安心な暮らしを守るキーテクノロジーとして期待できるものであり、機械関連企業にも大きな貢献が期待できると評価され、今回の受賞となりました。

(長大橋・技術部 技術革新・アセットマネジメントグループ 有馬敬育)



写真-1 受賞盾

## 今井経営計画部長 2020 IABMAS SENIOR PRIZE受賞

Dr. Imai was awarded 2020 IABMAS SENIOR PRIZE

2021年4月11日から18日まで第10回橋梁の維持管理と安全性に関する国際会議(IABMAS2020)が、新型コロナウイルスの影響で1年延期となりオンラインで開催されました。その中で今井経営計画部長が2020 IABMAS SENIOR PRIZEを受賞しました。

IABMASとは橋梁維持管理、安全、マネジメントに関する国際会議で1999年に設立され、2002年の第1回会議以降2年ごとに開催され、今回が10回目となりました。その会議の中で橋梁維持管理、安全、マネジメント、アセスメント、ライフサイクルコストなどの功績が認められた人にIABMAS AWARDSが年齢に応じてSenior, Junior, Youngの3つに分けて贈られており、今井経営計画部長の本州四国連絡橋の建設・維持管理、米国での橋梁に関する研究、PIARC橋梁委員会での活動などの功績が認められ今回の受賞に至ったものです。

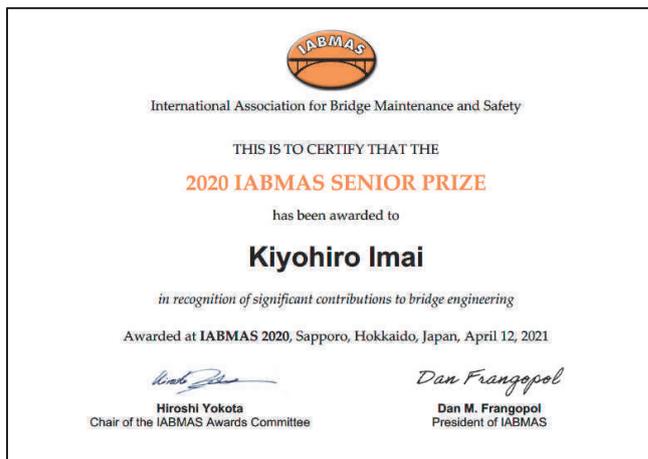


写真-1 IABMAS SENIOR PRIZE 受賞証

(経営計画部 経営計画課長代理 池田秀継)

## 吊橋ケーブル送気乾燥システム「土木技術十二選」に選定される

Dry air injection system for suspension bridges selected as one of the best 12 civil engineering technologies

本四高速が世界に先駆けて開発した、吊橋ケーブル送気乾燥システムが、土木学会が募集する「土木技術十二選」に選定され、トップを飾って土木学会誌2021年7月号で紹介されました。土木技術十二選は、「先端技術」、「脈々と続く技術」、「特殊な調査・解析技術」など、各社の一押し技術を募集し、応募があった36技術の中から、土木学会誌編集委員会にて選定が行われるものです。

吊橋ケーブル送気乾燥システムは、吊橋を構成する部材の中で最も重要な部材である主ケーブルを確実に防食することを目的に開発されたものです。従来技術のように主に塗装により水分を遮断する方法ではなく、ケーブル内部に乾燥した空気を送り込むことで腐食を抑制するもので、世界で初めて明石海峡大橋で採用されました。ケーブル内部の乾燥状態は、温湿度センサーによる自動計測により遠隔でモニタリングされ、管理基準値（ケーブル内の相対湿度40%）超過や機器異常が発生した場合には、瞬時に把握することができます。また、このシステムは、新設の橋梁だけではなく、既設の橋梁に対しても導入が可能で、高い防食効果を発揮することができます。

明石海峡大橋で採用されて以降、このシステムは国内外の主要吊橋で導入が進められており、吊橋ケーブルの防食技術の世界標準になりつつあります。世界に先駆けて技術開発及び実橋への適用が行われ、吊橋の維持管理技術の発展に大きく貢献したことが認められ、このたびの選定に至ったものです。

土木学会誌土木技術十二選（吊橋ケーブル送気乾燥システム）<https://www.jsce.or.jp/journal/tech12/202107/index.shtml>

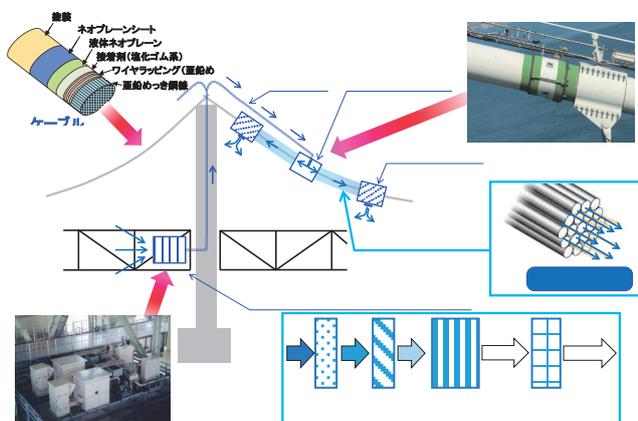


図-1 吊橋ケーブル送気乾燥システム概要図  
 (長大橋・技術部 総括・耐震・耐風グループ  
 遠山直樹)

本州四国連絡橋関連技術文献紹介 (21.02~21.07)

題 名	著 者	雑誌名等	巻 号	年 月	頁
近赤外線計測による防食塗装膜劣化の定量評価	松本悠希 阪上隆英 塩澤大輝 溝上善昭 有馬敬育 林昌弘	日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス		201812	4
赤外線応力計測による鋼橋梁部材の疲労き裂進展性評価と補修効果検証	寺内勇希 井原航生 塩澤大輝 阪上隆英 溝上善昭 有馬敬育 林昌弘	日本機械学会 M&M2018材料力学カンファレンス		201812	4
明石海峡大橋を体感する	竹口昌弘	日本風工学会誌第45巻第04号	45	202010	4
橋と風を見て歩く	勝地弘 竹口昌弘	日本風工学会誌第45巻第04号	45	202010	4
本州四国連絡橋における塗装の維持管理	竹口昌弘 大谷康史	色材協会誌 2021. MAR Vol. 94 No. 3		202103	7
Analytical formulas of thermal deformation of suspension bridges	Yi Zhou, Yong Xia, Yozo Fujino, Kazunori Yamaguchi	Enginring Structures 238 (2021) 112228		202107	12
吊橋ケーブル送気乾燥システム(土木技術十二選)	本州四国連絡高速道路(株)	土木学会誌 2021.07 Vol. 106 No. 7		202107	1

※本四技報, 技術発表会は除外。

本四技報編集委員会・幹事会名簿(五十音順)令和3年4月22日現在

委員長	福永勸	幹事長	西谷雅弘
委員	遠藤和男	幹事	有馬敬育
	後藤敦平		池田秀継
	澤純史		大串弘幸
	杉山剛弘		蔵森和生
	西谷雅史		河野正樹
	布廣淳史		高森敏博
	廣田昭次		田中輝良
	藤城忠朗		遠山直樹
	宮口典博		中山義雄
	向原和明		橋本龍
	村上博基		東窪則文
	森下尊久		藤城忠朗
			藤田憲二
			三橋直樹
			横井芳輝

本四技報 第137号

発行 令和3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)  
<https://www.jb-honshi.co.jp>



古紙/PLP配合率70%再生紙を使用

