

本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.49 No.143 2025.3

本州四国連絡高速道路株式会社編集

EDITED BY HONSHU-SHIKOKU BRIDGE EXPRESSWAY COMPANY LIMITED

本四技報 第 143 号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.143

【巻頭言】

世界平和……………森若峰存… 1
Our goal is to achieve world peace through the use of civil engineering technology

【技術論文】

吊橋ハンガーロープ定着部周辺のひずみ測定による張力変動推定に関する検討……………綾城威歩生・横井芳輝… 2
Estimation of hanger tension fluctuations by strain measurement of stiffener at hanger rope anchorage

道路鉄道併用吊橋のハンガーロープ取替えに係る安全性照査……………福原将吾・高見洋平… 8
Safety verification for hanger rope replacement in a suspension bridge for highway and railway

LPWA 無線ひずみ計測による遠隔監視手法の実践……………栄 翔太・藤田憲二・後藤稜平…16
Practical implementation of remote monitoring method using LPWA wireless strain gauging

孫崎高架橋の応力計測と疲労耐久性評価……………横井芳輝・田村拓登・木内愛理…22
Stress measurement and fatigue durability evaluation in Magosaki viaduct

BIM と連携したタブレット端末による長大橋点検支援システムの開発……………河野晴彦・山口和範・杉山剛史…30
Development of a long span bridge inspection support system using tablet linked to BIM

長大橋点検を支援する腐食検出 AI の構築……………田村拓登・河野晴彦・杉山剛史…36
Development of corrosion detection AI to support long-span bridge inspections

多々羅大橋のケーブル近接点検における取組……………小坂祐輔・本郷誠人…43
Efforts for close visual inspection of the Tatara bridge cables

【技術ニュース】

第 12 回 国際吊構造橋梁管理者会議 (ICSBOC 2024)……………下瀬恒大…49
12th International cable supported bridge operators conference (ICSBOC 2024)

長大橋建設・維持管理研修 (デンマーク・スウェーデン)……………小林弘昌…50
Training of long-span bridge construction, operation and maintenance in Denmark and Sweden

メコン川に架かる斜張橋……………西谷雅弘…51
Cable-stayed bridges across Mekong River

PIARC TC4.2 橋梁委員会……………坂本佳也…53
PIARC TC4.2 Bridges

国内における技術支援活動……………二宮仁司…54
Domestic technical supports

【保有特許】

保有特許一覧……………55
List of patents

【文献紹介】

本州四国連絡橋関連技術文献紹介……………57
Technical articles related to Honshu-Shikoku Bridges

吊橋ハンガーロープ定着部周辺のひずみ測定による 張力変動推定に関する検討

Estimation of hanger tension fluctuations by strain measurement of stiffener at hanger rope anchorage



写真-1 ひずみゲージ貼付状況 (ハンガーブラケット-鉛直リブ)

Photo 1 Strain gauges (hanger bracket - vertical stiffener)



写真-2 ハンガーロープ架替時測定状況

Photo 2 Measurement at hanger rope replacement

道路鉄道併用吊橋のハンガーロープ取替えに係る安全性照査

Safety verification for hanger rope replacement in a suspension bridge for highway and railway



写真-3 道路鉄道併用吊橋(瀬戸大橋)

Photo 3 Suspension bridge for highway and railway (Seto-Ohashi Bridge)



写真-4 吊橋ハンガーロープの腐食状況(瀬戸大橋)

Photo 4 Corrosion of a hanger rope of a suspension bridge (Seto-Ohashi Bridge)

LPWA無線ひずみ計測による遠隔監視手法の実践

Practical implementation of remote monitoring method using LPWA wireless strain gauging



写真-5 ひずみゲージ取付状況

Photo 5 Strain gauge installation

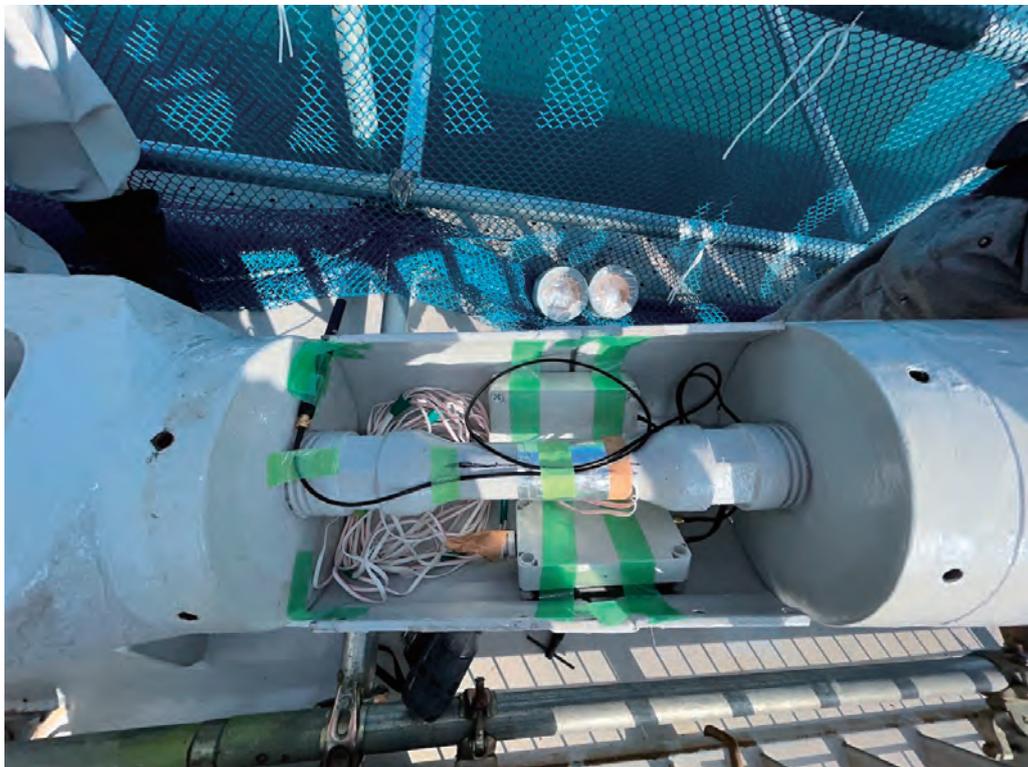


写真-6 ロッドへの計測機器設置

Photo 6 Measurement devices at the rod

孫崎高架橋の応力計測と疲労耐久性評価

Stress measurement and fatigue durability evaluation in Magosaki viaduct



写真-7 荷重車載荷試験走行状況

Photo 7 Loading vehicle run on the Magosaki viaduct



写真-8 荷重車載荷試験時応力計測状況

Photo 8 Stress measurement at loading test

BIMと連携したタブレット端末による 長大橋点検支援システムの開発

Development of a long span bridge inspection support system using tablet linked to BIM



写真-9 BIX-eye による重畳(大島大橋)

Photo 9 Superimposition by BIX-eye (Oshima Bridge)



写真-10 現場実証試験(大島大橋)

Photo 10 on-site test (Oshima Bridge)

長大橋点検を支援する腐食検出AIの構築

Development of corrosion detection AI to support long-span bridge inspections



写真-11 AIによる腐食検出結果

Photo 11 AI-based Corrosion Detection Results

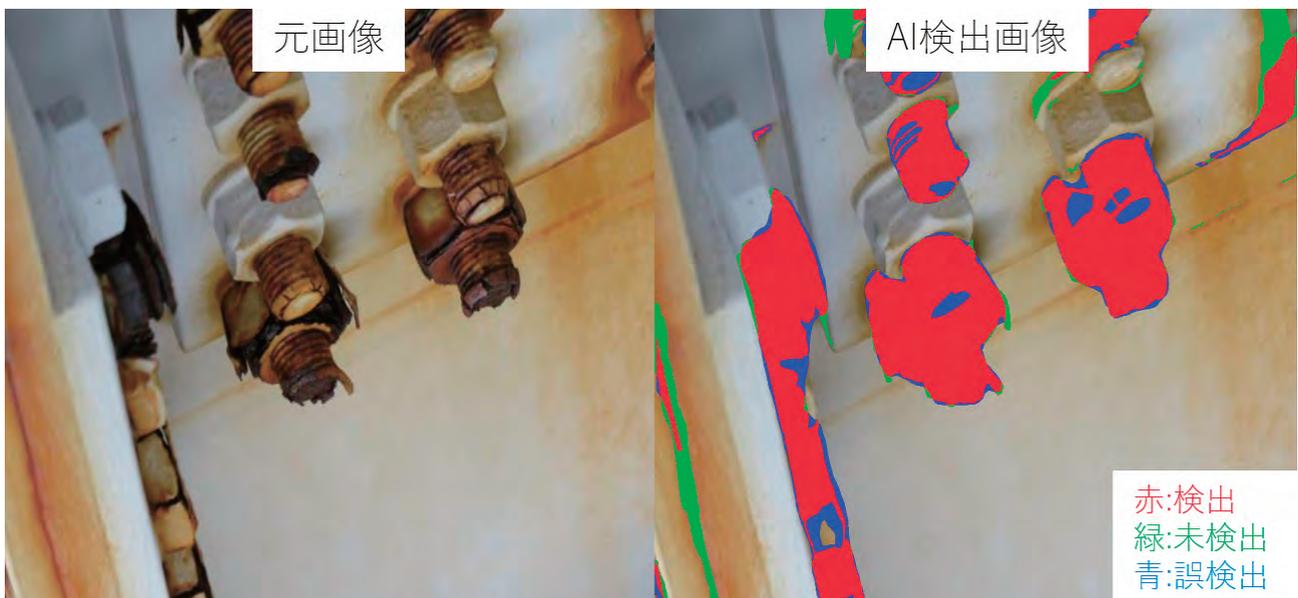


写真-12 AIによる腐食検出結果の精度評価

Photo 12 Accuracy Evaluation of AI-based Corrosion Detection Results

多々羅大橋のケーブル近接点検における取組

Efforts for close visual inspection of the Tatara bridge cables



写真-13 斜張橋ケーブル点検装置走行状況

Photo 13 Movement of the cable inspection equipment on the cable-stayed bridge



写真-14 斜張橋ケーブル点検装置による表面取得画像

Photo 14 Cable surface image from the stay cable inspection equipment

世界平和

Our goal is to achieve world peace through the use of civil engineering technology.

本州四国連絡高速道路株式会社 取締役常務執行役員 森若 峰存
元山口県 土木建築部長, 元三重県県土整備部次長 Mineari Moriwaka

今年2025年1月、アウシュビッツ解放80年式典の報道。私は道路を通じて社会貢献をしたい。明石海峡大橋はスリムで遠くからでもトラックの動きを確認できて感慨深い。人やクルマの流れを確認できると、道路が暮らしを支えていると想像できて安心できる。

2019年、地元検討会は下関北九州道路について橋梁案が比較的優位との報告書をまとめた。地元アンケートでは、異常気象や災害時に通行規制の少ない道路を重視すべきとの回答。有識者からは、断層の位置やずれ量の考え方、断層のずれに対し機能回復が可能な構造とすべきとの意見。トンネル案は、気象の影響を受けにくい、危険物は通行不可。こんな理由だったけど、明石海峡大橋は震災でずれたが対応できたよねと、口頭で説明すると伝わりやすかった。明石海峡大橋は、そのまとめる作業に自信を与える存在だった。ここで知ったのは、地元銀行は、資金や資源を保有している、新しいアイデアに貪欲、事業継承のような地域貢献にも意欲があった。別件で地元企業が一部費用を負担するとの申し出があった。架けた橋にも携わったけど、内心では「冗談でしょ?」と思ったけど、お話してみると欧米へなどの展開の早い企業体質だった。「この施設のネーミングライツの募集は希望者はないだろう」と思ったけど、高い世界シェアを持つ地元工場のその参加意図には感心した。30年以上付き合う地元建設会社は、DXでドイツの工場に見学してきましたよとか、実績を重ねてメンテナンスに拡大をしていますとか、元気な会社が多数あって頼もしい。橋面補修の会社が海外展開したいというお話を聞いた時には、自社の技術が海外でもお役に立てるだろうとの純粋な動機だった。いろんなアイデアをお持ちの首長は多い。上司だった知事は、地域のことは地域で考えるから東京の知恵は迷惑だというのがいて頼もしかったし、地方に住みながら世界とつながる可能性は広がっている。

今年1月17日、両陛下は追悼式典に出席。天皇陛下のお言葉には、復興、感謝、寄り添い、心を寄せ、経験と教訓を生かした支援、「そこで得られた知見が国の内外に広がり、次の世代へと引き継がれていくことを期待いたします」というキーワード。神戸市内での言葉だけど、国民に向けた言葉ととらえることもできる。2019年令和元年5月1日、即位した陛下は「国民の幸せと国の一層の発展、そして世界の平和を切に希望します」と。この言葉への答えの一つがそのお言葉だったと私は感じている。珠洲市長も列席していた。1.17, 3.11, 能登などの被害は悲惨だが、生まれたつながりは後世に残り得る。

2018年、外国船籍大型貨物船が大島大橋(周防大島)に

衝突した。架橋した会社の力を得て復旧した。技術はすごいと感じ、解析のような技術もすごいんだけど、現場仕事のすごさ、ネットワークで仕事をするすごさに感謝した。海運会社幹部が訪れ謝罪、知事は「道路と水道は生命線で大変な苦難を強いられている。衝突後も通報することなく運行を続けたことに強く憤りを覚え、遺憾だ」と述べた。私の怒りも増す。私は自分の任務に集中し、人でなしな彼らには、そのような国民性と企業風土なのだろうとのあきらめを持った。これが自国民や地元であれば違う対応だったのだろうと想像できる。

1890年、エルトゥールル号は紀伊半島沖で沈没、島民による献身的な救護は、トルコで広く知られている。串本町のHPに情報があって、私もトルコ国民のお返しや島民に感謝。教えなければ伝わらないことと、国際関係では意識のつながりが大切なことを認識する。為政者の行動も大切であるが、国も企業も個人の集まりであり、一人ひとりの意識が関係を良好にさせるのだ。

『父からの贈りもの(長岡輝子氏)』には、大戦に進みつつある様子を「一般の庶民は戦争の恐ろしさなどまるで知らない時代だった。」と書いた。日清戦争などで勝利する日本で、近代兵器による悲惨さを切実に知っている世代はいなかったのだろうと想像すると、当時の国民意識はその程度だったのだろう。今は、戦争の悲惨さは、自分の痛みのように感じられるようになったと感じる。

1999年、建設中の津軽道に携わった。一般の住民たちは「高速道路を利用したことがない」という。想像すらできなかったようだった。利用したことがなければ、理解をしにくいだろうなあと、肩を落とした。地方に住む人のほうが、今のインフラ格差ともいべき災害に弱く不便な現状をそのまま受け入れて生活をしている。知ること、疑問を持つことは改善したいの願いにつながる。

長大橋梁に関係する企業は、「もっと吊橋革命を」などの技術者としてもっとこうすべきの主張をしてはいかがか。コストとか効率とか利益とかではなくて、技術者が判断して決めるという場面を増やしてはどうか。貢献できる技術を持っているのだから、国内外に向けてもっと。大儲けするという動機ではなくて、あなたと末永く何100年もお付き合いをしたいという動機で。陛下のお言葉には「震災を経験していない若い人たちが震災について、自主的に学び、考え、自分の言葉で発信し、」や「皆が助け合いながら、安全で安心して暮らせる地域づくりが進められる」ともあって、感慨深い。技術を持っている技術者は「自分も出来る」という気概で外に出てはどうか。小さな活動が国を変える。平和につながる。

吊橋ハンガーロープ定着部周辺のひずみ測定による 張力変動推定に関する検討

Estimation of hanger tension fluctuations by strain measurement of stiffener at hanger rope anchorage

綾城 威歩生 Ibuki Ayashiro

横井 芳輝 Yoshiteru Yokoi

本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
技術事業本部 技術開発部 技術2課

国土交通省 国土技術政策総合研究所
道路構造物研究部 橋梁研究室 主任研究官
(前)長大橋技術部
技術革新・アセットマネジメント課担当課長

概要

吊橋ハンガーロープに加わる常時張力を測定する手法としては振動法が主流であるが、活荷重載荷や工事影響等による経時的な張力変動を把握するために用いることは難しい。また、ロードセルや油圧ジャッキを用いることで、張力変動を直接測定することは可能であるものの多大な労力を要する。そこで、ハンガーロープ定着部周辺の応力解析を行い、定着部補剛材に発生する応力変化からハンガー張力の変動を推定する手法について検討を行った。また、瀬戸大橋のハンガーロープを対象に、定着部補剛材のひずみ値から推定した張力変動と、ロードセルにより直接測定した張力変動を比較し検証を行った結果、両者の値にはおおむねの整合性が確認されたことから、定着部補剛材におけるひずみ測定を通じてハンガーロープの張力変動を推定できる可能性が示唆された。

The vibration method is the most common method for measuring the constant tension applied to suspension bridge hanger ropes. On the other hand, it is difficult to use this method to grasp tension fluctuations due to variable loads such as live loads and construction effects. We can directly measure tension fluctuations by using load cells and hydraulic jacks, which is so labor-intensive. Therefore, we conducted a study on estimation method of hanger tension by strain measurement of stiffener at hanger rope anchorage, through the stress analysis at the same spots. In addition, we compared between the hanger tension estimated by measuring the strain of the stiffener and the tension directly measured on the bridge. The results shows that the values are generally consistent with each other, indicating the possibility that we can estimate the hanger tension through strain measurement at the anchorage stiffeners.

1. はじめに

吊橋ハンガーロープ(以下「ハンガー」という。)は補剛桁に加わる荷重を主ケーブルに伝達するための重要な構造部材である。実橋におけるハンガーの張力測定は、吊橋の健全性を把握するために不可欠な項目の一つであり、本州四国連絡橋においては点検管理要領に定められる精密点検の中で実施されている。ハンガー張力の測定にはハンガー諸元及び固有振動数の測定値から張力を算出する振動法が用いられることが多く、近年ではスマートフォンに内蔵された加速度センサーを用いた手法も実用化されている¹⁾。一方で、ロープ類の腐食に伴う断面欠損が問題となる中、ハンガー取替といった工事での隣接ハンガーにおける張力変動の監視や、疲労耐久性評価等の基礎資料取得の手段として、ハンガーに加わる経時

的な張力変動を把握することは重要であると考えられる。しかし、振動法は主に死荷重による常時張力の測定を目的としたものであり、車両の走行といった活荷重、又は工事の影響等によるハンガーの経時的な張力変動を把握するために用いることは困難である。また、ロードセルや油圧ジャッキを用いることで張力変動を直接的に把握することは可能であるものの、測定には大掛かりな設備が必要となり、多大な労力を要する。

ここで、瀬戸大橋のハンガーは、補剛桁にとりついてあるハンガーブラケットに定着されている²⁾(図-1)。この定着部周辺部材では、ハンガーソケットから支圧板等を介してハンガー張力の変動に伴う応力変化が発生していると考えられる。反対に、この応力変化を測定することでハンガー張力変動を簡便に推定することができないか、検討を行うこととした。

具体的には、定着部周辺の鉛直リブ(写真-1)に着目

し、部材応力解析からハンガー張力と部材に作用する応力の関係性を整理することにより、ハンガー張力変動を推定する手法の提案を行った。合わせて、実橋において鉛直リブのひずみ測定から推定したハンガー張力変動と、ロードセルにより直接測定した張力変動の比較、検討を行った。本稿ではこれらの検討結果について報告する。

2. 応力解析によるハンガー張力変動推定手法に関する検討

2.1 解析手法

解析は南備讃瀬戸大橋の格点75のハンガーブラケット構造を対象とし、3次元FEM解析(線形解析)により行った。解析モデル図を図-2に示す。ハンガーブラケットの主要部材は板厚22mm程度の鋼板が集成した構造であることからシェル要素を主体とし、厚板構造の支圧板、ロックプレート、調整プレート、ハンガーソケットにはソリッド要素を用いた。特に着目する鉛直リブ付近は、25mm程度を基本にメッシュ分割した。それぞれの部材の浮き上がりや摩擦を考慮できるように接触面には接触条件(コンタクト条件、摩擦係数0.25)を設定した。モデル範囲は、水平梁と斜材のボルト接合部までの切出しモデルとし、この位置に剛体要素を設けて、その主節点(中心の節点)を完全拘束とした。

荷重は、ソケット下端にハンガー1本あたりの荷重を上向きに載荷した。なお、集中荷重で載荷すると載荷点の変形が大きくなるため、補間要素(NastranのRBE3要素)を用いて荷重がソケット内部の広範囲に分散して載荷されるように配慮した。ハンガー張力は別途測定された張力値を参考に437.5kN箇所とした。

2.2 解析結果

各鉛直リブの応力性状は同様であるため、最も内側(道路側)のリブを代表として結果を述べる。まず、鉛直リブ内の応力の流れとして、板厚中心の主応力のベクトル図を図-3(a)に示す。図-3(a)より、下面から作用する鉛直力がブラケット側に向かってせん断力に置き換わって伝達されている様子が確認できる。一方で、鉛直方向の圧縮応力が卓越する範囲は鉛直リブの先端側であることがわかる。

この内、鉛直方向応力に着目して整理を行う。図-3(b)に荷重載荷時の鉛直リブにおける鉛直方向応力のコンター図を示す。図-3(b)からも分かるとおり、鉛直方向応力は荷重作用点となる鉛直リブ下端及びリブ先端(コバ面側)で最大となり、下端及び先端から離れるほど小さくなる。また、鉛直方向応力について、高さ100mmごとにおけるx方向(板幅方向)の分布を整理すると図-3(c)のとおりとなる。図-3(c)より、リブ下端(y=0mm)では、支圧板の形状等の影響を受けて複雑な分布となっている一方で、下端から300mm以上ではおおむね三角形

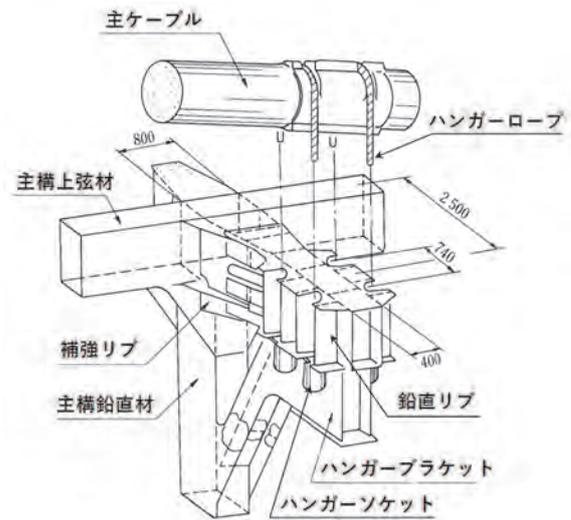


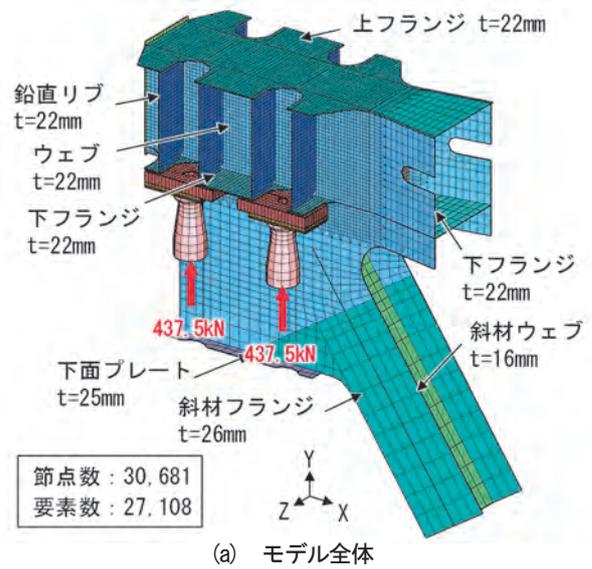
図-1 瀬戸大橋ハンガーローブ定着構造

Fig.1 Hanger rope anchorage of Seto-Ohashi Bridges



写真-1 鉛直リブ

Photo 1 Vertical stiffener at hanger rope anchorage



(a) モデル全体

(b) ハンガー定着部近傍

図-2 解析モデル図

Fig.2 Analytical model

分布となることが確認できる。

続いて、**図-4**に定着部付近の変形状況を示す。**図-4**より、ハンガーソケットからの反力により支圧板に曲げ変形が生じ、それに追従する形で鉛直リブが面外方向に変形(板曲げ)している様子が分かる。ここで、**図-5**に鉛直リブの先端から50mm位置における鉛直応力の高さ方向の分布(板の表裏面及び板厚中心)を示す。**図-5**のとおり、リブ下端付近では大きな板曲げ応力が発生するが、300mm程度離れると板曲げの影響が小さくなる様子が確認できる。

また、支圧板を通じてケーブルソケットから入力される鉛直力は、その大部分が鉛直リブを介してブラケットに伝達されるが、一部は下フランジから直接ブラケットに伝達される。ここで、鉛直リブの鉛直力の分担割合、及び高さ方向における分担割合の変化を**図-6**に示す。なお、分担割合は鉛直リブに作用する断面内の鉛直応力を積分して求めた鉛直力と全作用荷重の比として求めている。**図-6**より、鉛直リブの鉛直力分担割合は、リブ下端において全作用荷重の約8割程度であり、残りの2割

程度は下フランジを介して伝達していると考えられる。また、高さ方向に着目すると、荷重作用点のリブ下端で最大値をとり、かつリブ上端でゼロとなるような三角形分布となっている。

以上の解析結果から、鉛直リブ内で鉛直方向応力は板幅方向、高さ方向ともに三角形分布となると仮定し、鉛直リブの任意の位置の鉛直方向応力 $\sigma_v(x,y)$ とハンガー張力 T の関係を**式(1)**として整理した。

$$T = \frac{1}{C} * \frac{B}{B-x} * \frac{H}{H-y} * \sigma_v(x,y) * A \quad (1)$$

- T :ハンガー張力(N)
- B :鉛直リブ幅(mm)
- H :鉛直リブ高さ(mm)
- x,y :応力測定位置(mm)
- A :鉛直リブ断面積(mm²)
- C :鉛直リブの応力分担率(=0.8)
- $\sigma_v(x,y)$:板厚中心の鉛直方向応力(N/mm²)

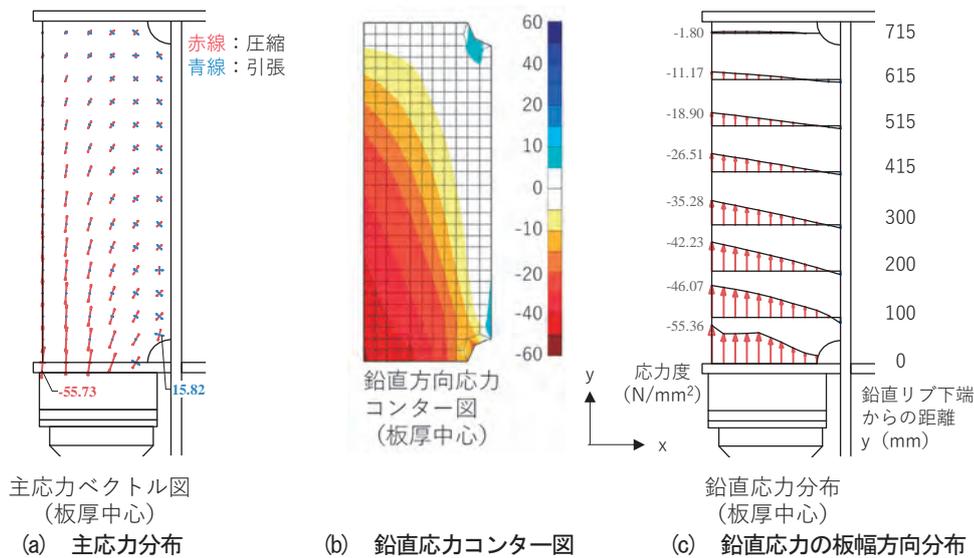


図-3 鉛直リブ内応力分布
Fig.3 Stress distribution at vertical stiffener

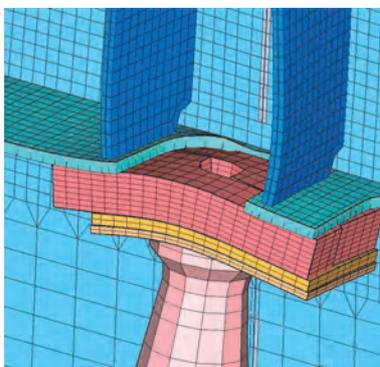


図-4 鉛直リブの変形状況(変形倍率=200倍)
Fig.4 Deformation of vertical stiffener

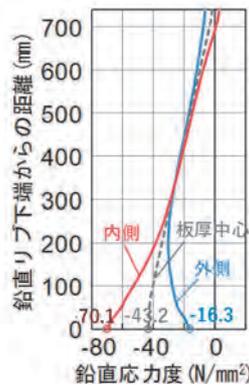


図-5 面外曲げ応力
Fig.5 Flexural stress

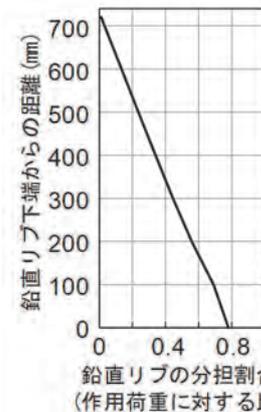


図-6 鉛直力分担割合
Fig.6 Sharing ratio of vertical load

ここで、式中の各記号は図-7による。この式を用いることで、鉛直リブの任意の応力変動が測定できれば、ハンガー張力変動を推定できる可能性がある。ただし前述のとおり、荷重作用点となるリブ下端近傍では応力集中や面外変形の影響が大きいため、この影響を受けにくい位置(リブ下端から300mm程度以上離れた位置)で応力測定を行うことが望ましいといえる。

3. 実橋ハンガーロープ定着部のひずみ測定による張力変動の推定

3.1 測定方法

測定は南備讃瀬戸大橋(道路鉄道併用の3径間連続補剛トラス吊橋)の下り線格点76におけるハンガー架替工事にあわせて、下り線格点75~77を対象に実施した。なお、格点75~77のハンガーブラケットは同構造である。対象格点位置を図-8に、格点ごとの測定項目及び測定点数を表-1に示す。

張力変動(実測値) ΔT_m は、図-9に示すようにハン

ガーブラケット下部に架台等を設置し、センターホールジャッキによる引き込み力の反力をロードセルにて測定した。なお、引き込みは一つの格点につき4箇所同時に実施した。

張力変動(推定値) ΔT_e は、図-9のとおり、引き込み力に応じてハンガー張力による支圧作用位置がハンガー定着部からハンガーブラケット下面へと盛り替えられることで、鉛直リブに加わる圧縮力が解放される挙動に着目し、リブの鉛直方向ひずみ測定値を式(1)を用いて張力に換算することで算出した。図-10にひずみ測定位置を示す。鉛直リブの下端から370mm(リブ高さ中央)、コバ面から50mm位置の両面に2軸ゲージを貼り付け、ブリッジ回路を組むことで鉛直リブの面外曲げ成分を除去した(4アクティブゲージ法(直交配置法))。

測定は、図-9に示すハンガー引込時の張力変動(ケース1)と、変動荷重としてトラス桁内を貨物列車が通過した際の張力変動(ケース2)に着目して実施し、 ΔT_m 及び ΔT_e 両者の比較を行った。なお、サンプリング周波数は、ケース1にて10Hz、ケース2にて50Hzとした。

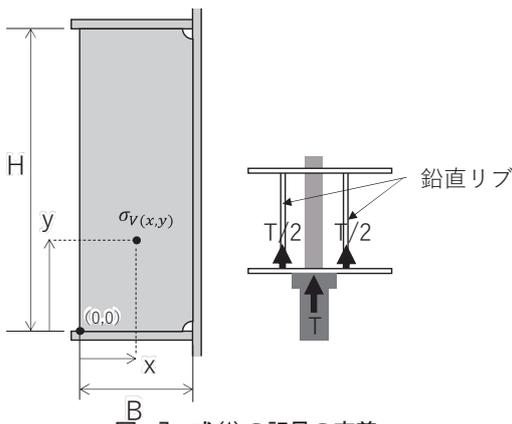


図-7 式(1)の記号の定義
Fig.7 Definition of symbols in formula (1)

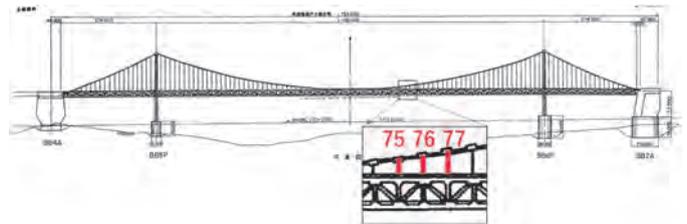


図-8 測定対象格点
Fig.8 Panel points targeted for measurement

表-1 測定項目・測定点数
Table 1 Number of Measuring points for each items

測定項目	測定方法	測定点数		
		格点75	格点76	格点77
ハンガー張力	ロードセル	4	4	4
定着部補剛材ひずみ	ひずみゲージ	8	8	8

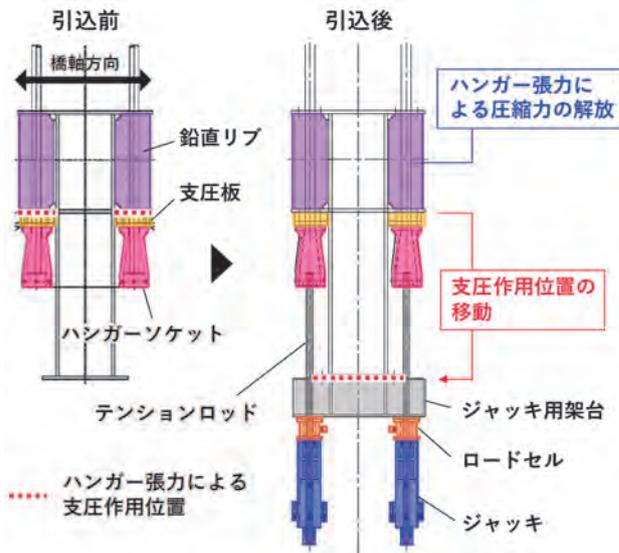


図-9 ジャッキによるハンガー引き込み概要図
Fig.9 Pulling in hanger rope by hydraulic jack

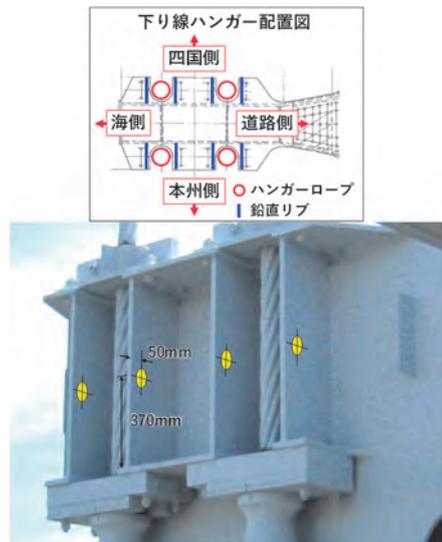


図-10 ひずみゲージ貼付位置
Fig.10 Position for attaching strain gauges

3.2 測定結果(ケース1:ハンガー引込時)

図-11に格点76のハンガー引込時におけるハンガー張力変動の時刻歴測定結果を示す。なお、グラフは死荷重状態(引込直前)からの変動量の絶対値を表している。

図-11より、 ΔT_m 、 ΔT_e は階段状に経時変動している様子が確認できるが、これはハンガーの引込み量を油圧ジャッキにて調整し、一定刻みで引き込んでいるためである。また、いずれのハンガーも、ある特定の時間以降は ΔT_m の変化に対して ΔT_e が変化せず、一定となっている。これは、ハンガーの引き込みに伴って鉛直リブ下面と支圧板との間で縁切れが発生したことで、鉛直リブに作用していたハンガー張力による圧縮力が解放されたことを示しており、その際の ΔT_m 及び ΔT_e の値を合わせて図-11中に記載している。なお、 ΔT_e 下部に記載の括弧内の数字は、 ΔT_m に対する比率($\Delta T_e/\Delta T_m$)を表している。この縁切れ発生時点の張力変動値が、引き込み前に導入されていたハンガー張力と釣り合い関係にあると考えた。

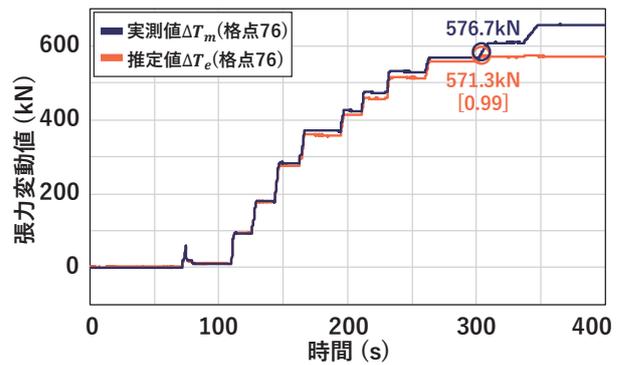
ここで、縁切れ時の ΔT_m 、 ΔT_e に着目すると、本州側の2箇所(図-11(a), (b))では比較的精度の良い推定値が得られている事が伺える。一方で、四国側の2箇所(図-11(c), (d))では ΔT_m に対して最大2割弱程度(約100kN)、 ΔT_e が小さい結果となった。また、四国側では本州側と比較して早い段階で縁切れが発生しており、縁切れ時の ΔT_m も小さいことから、箇所に応じて引き込む前の導入ハンガー張力に差異があった可能性が示唆される。

続いて、縁切れ発生までの挙動に着目すると、いずれのハンガーも ΔT_m 及び ΔT_e 両者の挙動はおおむね整合がとれていることが確認できる。ただし、本州側では変動の大きさにも整合が見られるのに対して、四国側では引き込む程度に応じて ΔT_m 及び ΔT_e 両者の値の差異が開く結果となった。この原因の考察については後述する。

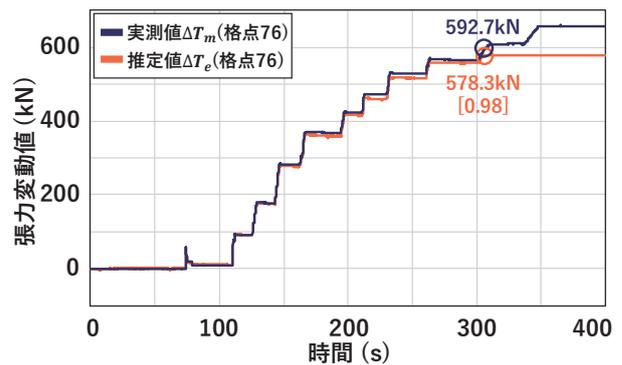
3.3 測定結果(ケース2:貨物列車通過時)

図-12に、貨物列車が南備讃瀬戸大橋を通過中と想定される間における、ハンガー張力変動の時刻歴測定結果を示す。なお、グラフは死荷重状態からの変動量(絶対値)を表す。張力変動の実測のため、格点76のハンガーを引き込んだ状態で測定したが、ハンガー引込完了後はブラケット下部にハンガー張力の支圧作用位置が盛り替えられることで、鉛直リブにハンガー張力による応力が作用しなくなる。すなわち、同一格点においてロードセルとひずみゲージの同時測定が行えず、 ΔT_m 及び ΔT_e を直接比較することができない。そこで、格点75~77ではハンガー張力の影響線がおおむね一致すると仮定し、格点76の ΔT_m と格点75、77の ΔT_e を比較することとした。

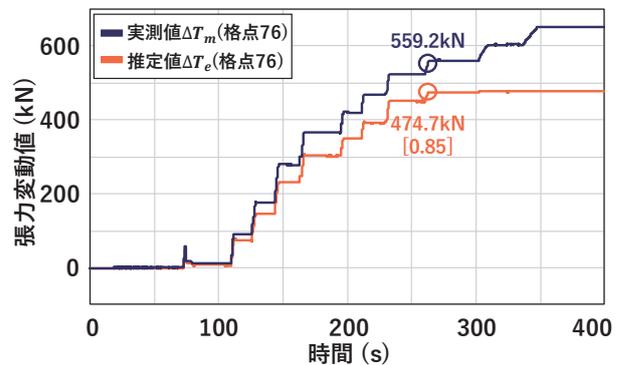
図-12より、貨物列車の通過に伴って山なりのような張力変動を生じていることが確認できる。また、いずれのハンガーにおいても、活荷重に対する応答波形は ΔT_m 及び ΔT_e の両者でおおむね一致しており、比較的動的な張力変動に対しても、ひずみ測定を通じてその傾向を捉



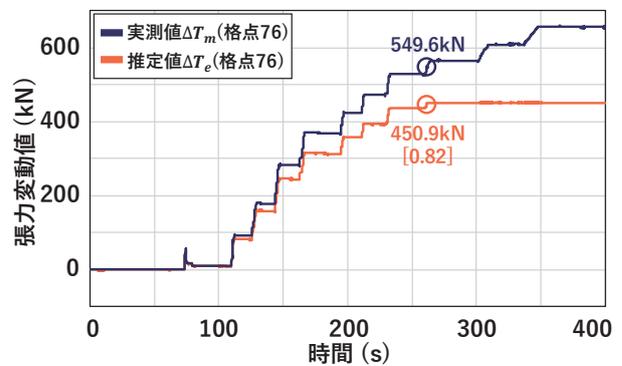
(a) 本州-海側



(b) 本州-道路側



(c) 四国-海側



(d) 四国-道路側

図-11 測定ケース1(格点76ハンガー引込時)

Fig.11 Measurement case 1
(When pulling in hanger rope at panel point 76)

えることができています。なお、 ΔT_m (格点76)のピーク時における、格点ごとの変動値を図中に記載している。これらの値に着目すると、 ΔT_m に対する ΔT_e の差異は最大で2割程度(10kN弱)であり、ケース1と同程度であった。

以上、ケース1及び2から、ハンガー張力変動に対する挙動はおおむね掴めているものの、箇所に応じて ΔT_m 及び ΔT_e に差異が生じていることを確認した。張力変動の推定にあたっては、いずれの箇所においても式(1)における前提条件(鉛直応力がリブ高さ・幅方向に対して三角形分布)が成立し、C(鉛直リブの応力分担率)等のパラメータが同一であると仮定している。対して、実際にはブラケット自体の傾きや、支圧板の反り、鉛直リブのねじれといった変形の影響による鉛直リブへの張力作用の偏心、応力分布の複雑化に伴い、定着箇所に応じたモデル化の誤差を生じていることが差異の一因として考えられる。本提案手法によってハンガー張力変動を簡便に把握できるものの、推定結果には一定の誤差が含まれている可能性に留意するとともに、推定精度向上に向け、今後さらなる検証を行っていく必要があるといえる。

4. おわりに

瀬戸大橋の吊橋を対象に、ハンガー定着部補剛材に発生する応力からハンガー張力変動を推定する手法について検討を行った。定着部の鉛直リブに着目し、応力解析からハンガー張力と部材内にかかる応力の関係性を整理した結果、荷重作用点となる鉛直リブ下端近傍では応力集中や面外変形の影響を受けるものの、この影響を受けにくい位置における応力測定結果から、ハンガー張力変動を精度よく推定できる可能性があることがわかった。

また、実橋測定により、定着部における鉛直リブのひずみ測定から推定したハンガー張力変動と、ロードセルにより直接測定した張力変動の比較を行った結果、両者の間にはおおむね整合性が取れていることを確認した。

以上の検討より、本提案がロードセルや油圧ジャッキを用いた直接法と比較して簡易な方法でハンガー張力変動を把握できる手法となり得る可能性が示唆された。今後、活荷重に伴うハンガー張力変動振幅の把握や、工事影響による張力変動の監視を行う必要性が生じた際等において、本提案手法の活用が期待できると考える。一方で、本検討の中で ΔT_m 及び ΔT_e の間には、測定箇所によってその値に差異が生じていることが確認されたことから、引き続き検証を進めていく必要があるといえる。

参考文献

- 1) 本四高速道路ブリッジエンジニアリング株式会社「新技術|本四高速道路ブリッジエンジニアリング株式会社」。
<https://www.hbeng.co.jp/innovative/index16.html> (参照 2024-12-23)
- 2) 本四公団：瀬戸大橋の設計(吊橋編)，1999。

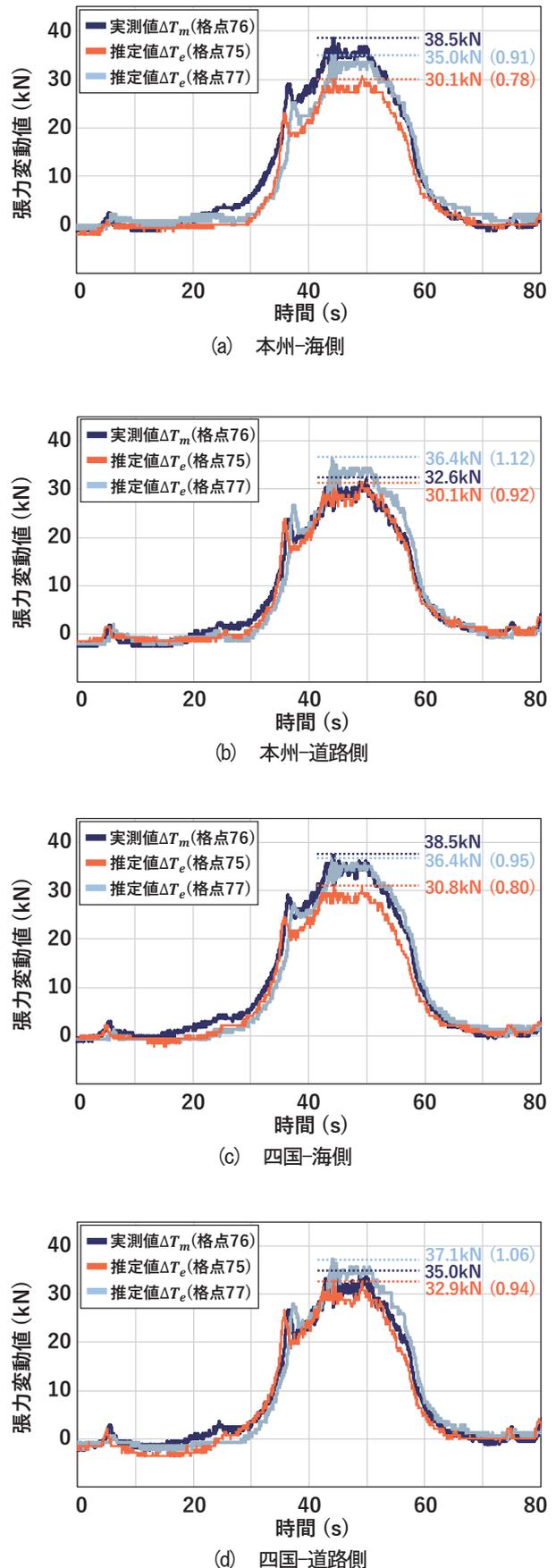


図-12 測定ケース 2(貨物列車通過時)
Fig.12 Measurement case 2
(When freight train passing)

道路鉄道併用吊橋の ハンガーロープ取替えに係る安全性照査

Safety verification for hanger rope replacement in a suspension bridge for highway and railway

福原 将吾 Shogo Fukuhara

(前)本四高速道路ブリッジエンジニア株式会社 技術事業本部
鳴門管理センター 工事課

高見 洋平 Yohei Takami

坂出管理センター
保全課長代理

概要

南備讃瀬戸大橋や下津井瀬戸大橋において、吊橋ハンガーロープの腐食による断面減少が確認された。腐食したハンガーロープの引張強度特性や実橋で試験施工を行ったロープ防せい工法(張力非解放タイプ)の充填性能を確認する目的で、実橋のハンガーロープを採取することになった。

ハンガーロープの撤去に伴う安全性照査では、道路鉄道併用吊橋であることを考慮し、構造安全性に加え、列車走行性の確認も行った。これらの取組みについて報告する。

Corrosion has caused reductions in the cross-sectional areas of the hanger ropes on the Minami Bisan-Seto Bridge and the Shimotsui-Seto Bridge. We sampled the hanger ropes from the bridge to verify the tensile strength characteristics of the corroded ropes and the filling performance of the anti-corrosion method (non-tension-release type) applied to the ropes tested on the actual bridge.

We conducted the safety verification associated with the ropes removal, considering that the bridge is a suspension bridge for both road and railway use. In addition to structural safety, we also assessed train operability. This paper reports these efforts.

1. はじめに

南備讃瀬戸大橋のハンガーロープ(以下、「ハンガー」という)の定着部では、2020年に腐食による断面減少率が10%に達するものが確認された(写真-1)。「本州四国連絡橋 吊橋CFRCハンガーロープ管理要領」(以下、「管理要領」という)によると、南備讃瀬戸大橋のハンガー定着部で許容される断面減少率は9.5%となっている。この管理要領は、他橋(大鳴門橋)で腐食したハンガーの引張強度特性に基づき算定されたものであり、瀬戸大橋における腐食形態やロープ構成を正確に反映しているものではない。そこで、瀬戸大橋で腐食したハンガーの引張強度特性を確認する目的で、実橋のハンガーを採取することになった。また、採取するハンガーを対象に、張力非解放タイプのロープ防せい工法(新工法)の試験施工を行い、防せい剤の充てん性能を確認することになった。

以上の目的から、実橋のハンガーを撤去する必要が生

じたため、撤去時の安全性照査を行った。



写真-1 ハンガーロープ定着部の腐食状況
(2020年, 下津井瀬戸大橋)

Photo1 Corrosion condition at the anchorage of hanger ropes

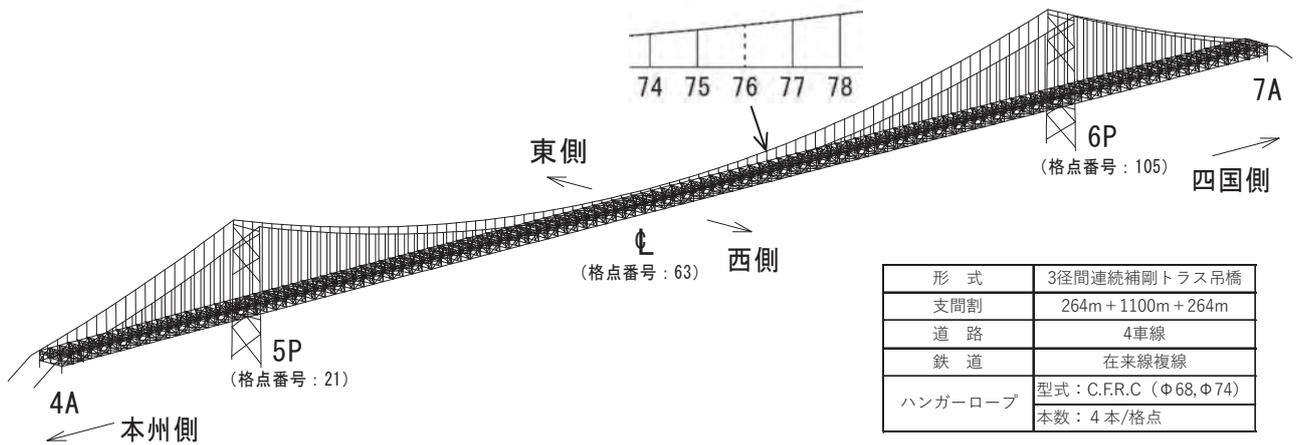


図-1 南備讃瀬戸大橋 立体解析モデル及び橋梁諸元

Fig.1 Analytical model and Outline of bridge

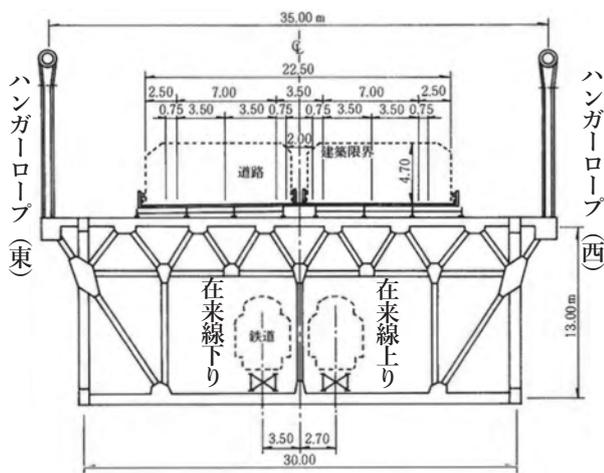


図-2 補剛桁 断面図

Fig.2 Cross section of the stiffening girder

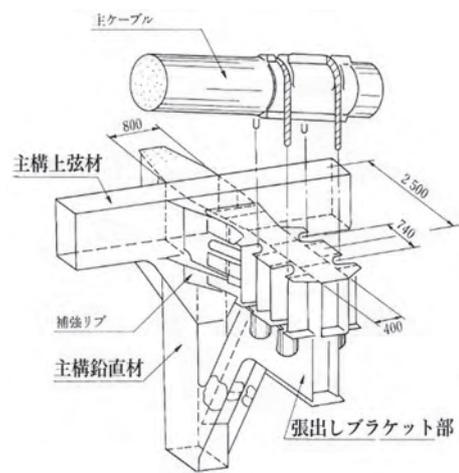


図-3 ハンガーブラケット構造

Fig.3 Hanger bracket structure

2. 照査概要

ハンガー撤去に伴う安全性照査は、次の条件で検討を行った。

- ・南備讃瀬戸大橋の格点76東側のハンガー(図-2)を撤去
- ・主ケーブルに2本鞍掛けされている(図-3)ハンガーを2本とも撤去した後、新品のハンガーを設置
- ・ハンガーが撤去(張力解放)されている時間は、最大で72時間
- ・道路、鉄道ともに供用させながらの取替施工

なお、2本鞍掛けされているハンガーを1本ずつ取替えると、ハンガーブラケットに大きなねじりモーメントが作用し、許容値を超過することが予備検討で判明したため、2本を同時に撤去することとした。

照査は、ハンガー撤去に伴う吊橋の構造安全性の照査に加え、ハンガー撤去時に補剛桁の変位が大きくなるこ

とが予想されたため、列車走行性の照査も行うこととした。なお、ハンガー張力の解放実績として、本州四国連絡橋では、因島大橋、大鳴門橋及び明石海峡大橋があるが、道路鉄道併用吊橋としては初めての張力解放となるため、列車走行性の照査は建設時の列車走行性に関する研究を参考に、照査項目や許容値の設定を行った。構造安全性及び列車走行性の照査は、構造解析を用いて実施した。

3. 全体解析

3.1 解析モデル

解析モデル(図-1)は、全てのトラス部材をモデル化した立体トラスモデルを作成した。解析モデルの形状は、前死形状(図-4)をモデル化した。実橋の形状である第1次完成形状は、前死形状に新幹線床組荷重を除荷、後死荷重を載荷する有限変位解析により算出した。

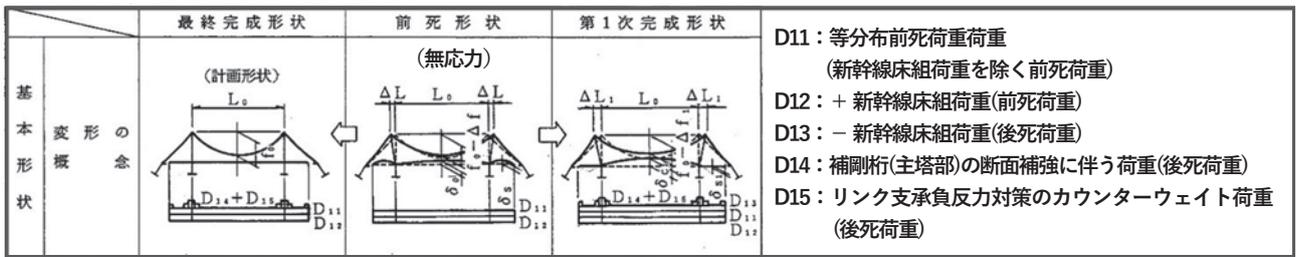


図-4 吊橋形状の概念(瀬戸大橋)

Fig.4 Concept of suspension bridge form(Seto Ohhasi Bridge)

3.2 解析モデルの妥当性確認

第1次完成形状の補剛桁鉛直座標及びハンガー張力について、建設時設計値と今回解析値を比較することで、解析モデルの妥当性について検証した。

補剛桁鉛直座標は、図-5に示すとおり、建設時の設計座標と比較して中央径間中央(格点63)で+0.047mとなったが、中央径間全体の形状は相似した。

ハンガー張力は、図-6に示すとおり、建設時の設計張力と比較して、塔付近で3%、中央径間で最大1.6%の差であり、同等の張力を得た。

以上から解析モデルは妥当と判断した。

3.3 荷重載荷ケース

荷重載荷範囲は、着目する部位、断面力や変位量によって異なるため、建設時の影響線図を参考に設定した。

荷重強度は、自動車・鉄道ともに建設時と同じ荷重とし、鉄道荷重は3.8t/m×370m/1軌道である。

表-1に荷重載荷ケース及び結果の概況を示す。

(1) 列車走行性(変位量)に着目した載荷ケース

列車走行性の照査は、ハンガー撤去に伴う変位量に着目した載荷ケースとし、照査箇所は取替格点付近に加え、建設時に特別な照査を行っている端支点部や中間支点部の角折れについても、ハンガー撤去の影響を確認する目的で解析・照査を行った。

また、ハンガー張力着目ケースと鉛直たわみ着目ケースを比較したところ、載荷範囲が大きく異なるにも係わらず、取替格点での各種軌道変位はほぼ同値であった。

(2) 構造安全性(断面力)に着目した載荷ケース

「吊橋の健全度診断システムの検討(その3)」によれば、1格点分のハンガーが損傷した場合、影響が大きくなる部材は、隣接のハンガーと主構斜材であるとされているため、それらに着目したケースとした。

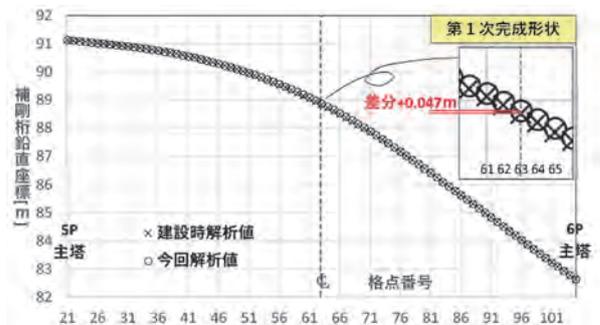


図-5 補剛桁鉛直座標(第1次完成形状)

Fig.5 Vertical coordinates of the stiffening girder

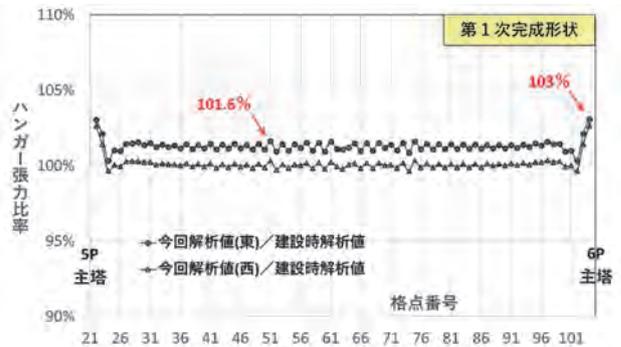


図-6 ハンガー張力(第1次完成形状)

Fig.6 Hanger tension

表-1 荷重載荷ケース及び結果の概況

Table 1 Loading cases and Summary of results

	着目量(着目位置)	鉄道荷重	鉄道荷重載荷範囲	結果概況
列車走行性	鉛直たわみ着目(取替格点)	複線	格点53~99	鉛直たわみ量(角折れ)最大
		単線	〃	東西傾き(水準変位)最大、橋直(通り)変位最大
	中間支点部のたわみ角着目(6P)	複線	格点105~125	-
	端支点部のたわみ角着目(7A)	複線	格点71~125	-
構造安全性	ハンガー張力着目(取替格点)	複線	格点30~105	ハンガー張力最大 ※たわみ量はたわみ着目と同等
		単線	〃	※水平変位、通り変位はたわみ着目と同等
	主構斜材軸力着目(取替格点)	複線	格点49~76	斜材軸力最大
		複線(単線対称)	格点49~76, 76~105	

4. 列車走行性の照査

4.1 照査項目

鉄道事業者との協議を踏まえ、列車走行性の照査項目は、以下の3つの軌道変位とした。

①角折れ、②水準変位(カント)、③通り変位

角折れは、列車進行方向の軌道の折れ具合を表す指標で、その構成要素を図-7 右側に示す。角折れは、形状が山形となる角折れを「上向き(+)」、形状が谷形となる角折れを「下向き(-)」と定義されている。

水準変位は、任意の断面における、2本のレールの高低差を表す指標で、その構成要素を図-7 左側に示す。

通り変位は、レール側面方向のゆがみを表す指標で、本来の通りからの水平変位量で定義される。

なお、主構の変位は3. 全体解析により、主横の変位は、別途、主横トラス平面解析により算出した。

4.2 許容値

(1) 水準変位及び通り変位

水準変位と通り変位は、吊橋に係わらず必要な軌道管理項目となっている。そのため旧国鉄が定めた整備基準値に基づく、整備目標値¹⁾を許容値として設定した(表-2)。

表-2 許容値(水準変位, 通り変位)

Table 2 Allowable track irregularity
(track irregularity in cross level, track irregularity in line)

変位種別	整備目標値	
	1級線(軌道検測車)	1級線(手計測)
水準	11mm	7mm
通り	23mm	7mm

(2) 角折れ

角折れは、橋梁特有の照査項目であり、建設時の資料で明確に謳われている許容値は、端支点部及び中間支点部の許容値のみであった。取替格点における許容値が明記されている資料が存在しなかったため、端部及び中間支点部における許容値が、取替格点にも準用できるかを確認する目的で、許容値の根拠を文献調査した。

文献調査の結果、角折れの許容値は、軌道構造の制限及び列車走行性から定まっていた。

「鋼橋直結軌道及び緩衝桁軌道伸縮装置設置要領・同解説(昭和59年)」によれば、軌道構造の制限として、支点部の許容値は、上向き角折れ7‰、下向き角折れ5‰である。これは鋼直Ⅲ形と呼ばれるレール締結装置を採用していることに起因していることがわかった。この許容値は、角折れにより生じる繰り返しが、締結装置の耐久性に影響することを考慮するものである。なお、同要領が対象とする角折れは、主構、主横及び鉄道縦桁のたわみにより生ずる合計値である。

「本州四国連絡橋の列車走行に関する研究 別冊1 走行分科会報告書(昭和57年)」によれば、列車走行性として、新幹線の輪重抜けに対する安全限度から、許容値は9‰とされている。許容値9‰の算定では、主構のみによる桁端部の角折れの他に、鉄道縦桁のたわみと同様の半正弦波のみの角折れ等も対象に検討されており、取替格点で想定している角折れにも適応可能と判断した。

以上より、取替格点は鋼直Ⅲ形の締結装置を採用しているため、取替格点の角折れ許容値として、安全限度より厳しい軌道構造の制限に基づく上向き角折れで7‰、下向き角折れで5‰を採用することにした。この許容値を鉄道事業者に提示し、了承を得た。

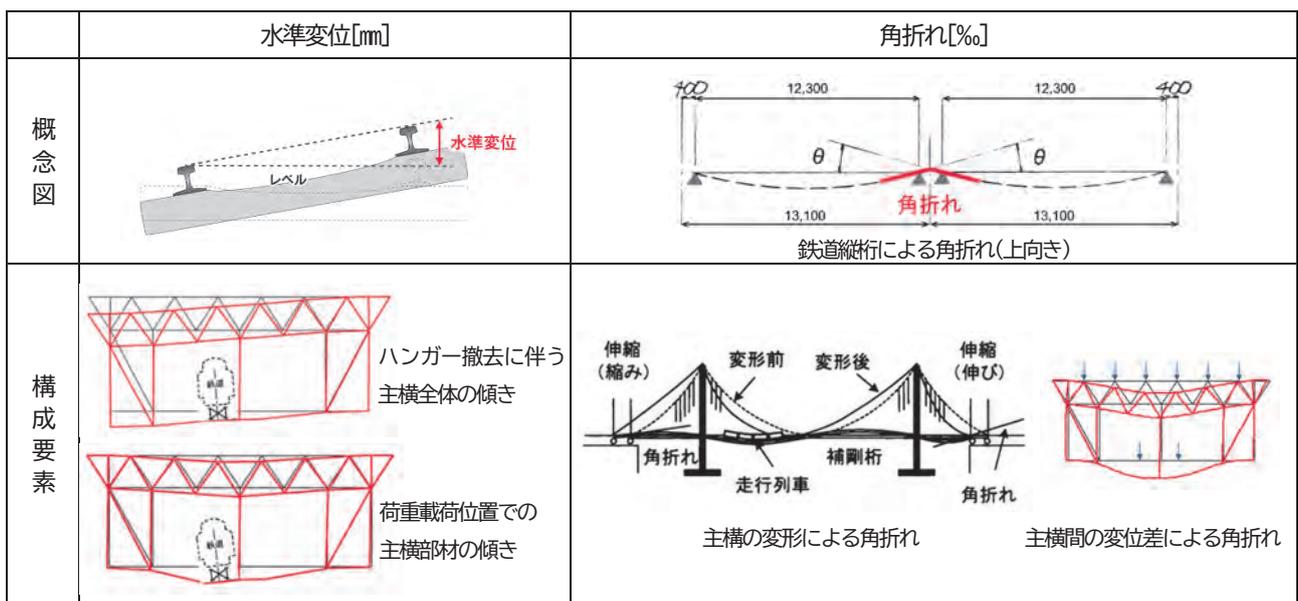


図-7 軌道変位の概念図及び構成要素

Fig.7 Concept diagram and element of track irregularity

4.3 照査・解析結果(変位)

図-8から図-11に全体解析の結果を示す。ハンガー撤去に伴う補剛桁の鉛直変位量は、死荷重状態における取替格点で、東側主構-8.4mm、西側主構-2.0mmであり、東西の変位差は6.4mmとなった(図-8)。また、活荷重載荷状態(東側単線載荷)における変位量は東側主構で-11.0mmであったため、その内、死荷重による変位量が約76%を占める結果となった。

水準変位(カント)は、建設時の設計では生じないとされているが、表-3に示すとおり、単線載荷の場合、ハンガーが有る状態でも8.19mmとなった。ハンガーを撤去した場合、0.3mm増加したが、許容値を満足した。また、図-9に示すとおり、複線載荷と比較して単線載荷の水準変位が大きくなった。

通り変位は、許容値13.0mmに対し、十分小さい解析結果となった(表-4)。

角折れは、7A端部において角折れ緩衝装置を設置後の設計設計書で既に許容値を超過していた。取替格点の角折れも全体解析でハンガーが有る状態で許容値を超過するが、ハンガー撤去による影響値は撤去前の0.1%未満であり(表-5)、安全限度の許容値が9%であることを考慮し、列車走行性に問題ないと判断した。また、取替格

点では、下向き角折れが-0.655%増大したが、許容値を満足する結果となった。

表-3 水準変位(東側単線載荷, 20°C)

Table 3 Track irregularity in cross level (east-side single-line loading)

着目部位	①解析値(主構)			②解析値(主構)	①+② [mm]	許容値 [mm]
	ハンガー有	撤去による影響値	ハンガー無			
取替格点76	8.190	0.300	8.490	0.078	8.568	11.0

表-4 通り変位(東側単線載荷, 50°C)

Table 4 Track irregularity in line (east-side single-line loading)

着目部位	①解析値	②実橋狂い(JR計測)	①+②[mm]	許容値[mm]
取替格点76	0.00024	2.000	2.000	13.0

表-5 角折れ(複線載荷)

Table 5 Track irregularity in angular bend (double-track loading)

着目部位	着目方向	解析値[%]			許容値 [%]
		ハンガー有	撤去による影響値	ハンガー無	
7A端部	上向き(20°C)	7.439	-0.005	7.434	7.0
6P支点部	上向き(50°C)	6.887	0	6.887	7.0
取替格点76	上向き(50°C)	7.095	0	7.095	7.0
取替格点76	下向き(50°C)	-2.758	-0.655	-3.413	-5.0

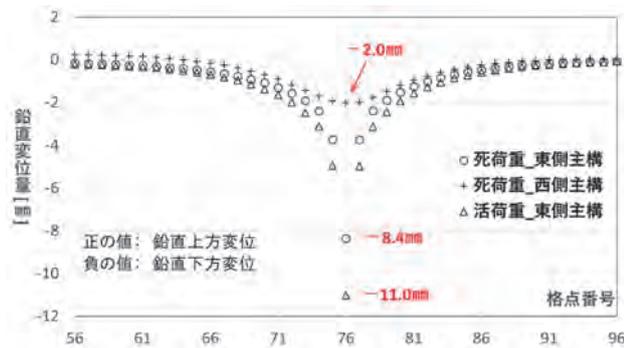


図-8 ハンガー撤去に伴う主構鉛直変位量 (たわみ着目載荷, 東側単線載荷, 20°C)

Fig.8 Vertical displacement of the main truss due to hanger removal

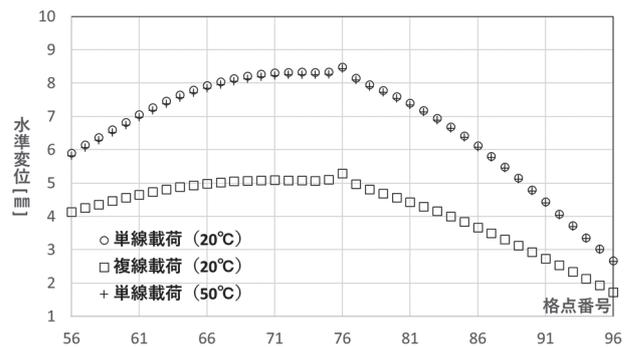


図-9 ハンガー撤去後の水準変位 (主構全体の傾き)

Fig.9 Track irregularity in cross level after hanger removal

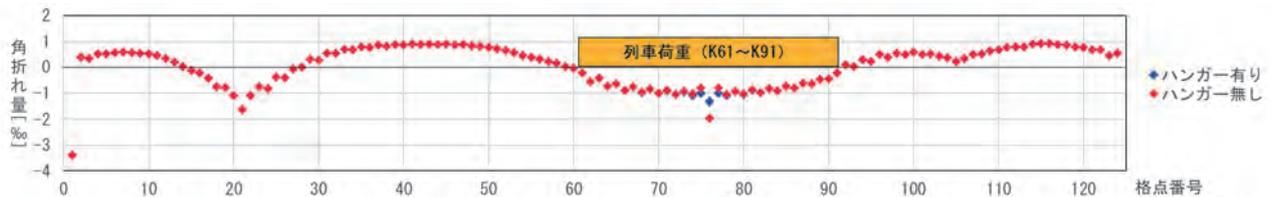


図-10 主構の角折れ量(ハンガー有無による比較)

Fig.10 Track irregularity in angular bend of the main truss (compare in term of presence or absence of hanger)

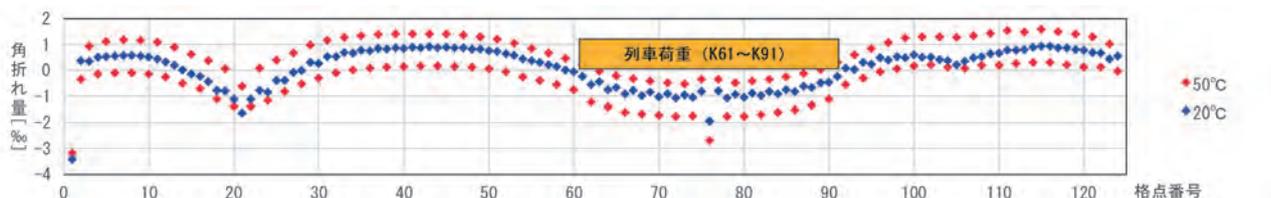


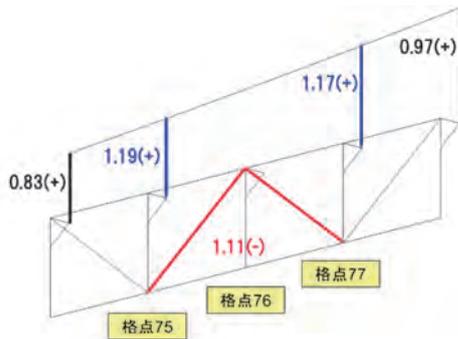
図-11 主構の角折れ量(温度による比較)

Fig.11 Track irregularity in angular bend of the main truss (compare in term of temperature)

5. 構造安全性の照査

5.1 建設時の設計荷重による照査

建設時と同じ設計荷重による照査では、隣接ハンガー張力と主構斜材軸力において照査NGとなった(図-12)。照査に用いた安全率は、完成系と同じハンガーロープは3.0、それ以外の鋼部材は1.7とした。架設時(施工時)の割り増し係数1.25(安全率:2.4)を採用することも考えられるが、完成系の3.0を目標とした。この理由として、H24道示²⁾では、供用しながらの補修工事に対して、架設時(施工時)割り増し1.25をそのまま適用はできないことになっているためである。



* 記載の数字は、常時の許容値に対する超過度を示す。
* (+)は引張状態を、(-)は圧縮状態を示す。

図-12 建設時の設計荷重による照査結果
Fig.12 Verification result based on design load

5.2 照査NGの方策1(活荷重の低減)

照査NGに対する方策として、実橋の供用条件を反映させるものとして、活荷重の低減を図った。

実態の鉄道荷重について鉄道管理者に対しヒアリングを実施した。低減活荷重の設定は、全ての列車編成を包括できる荷重を貨物、旅客の各々に設定した(表-6)。また、上り(西側)の鉄道荷重として、旅客の最大荷重を採用することにした。これは、貨物列車が、1日あたり上りが2本、下り3本と少なく、施工中の72時間において格点76付近で上下がすれ違い、更に自動車も満載となる可能性が極めて低いと判断したためである。

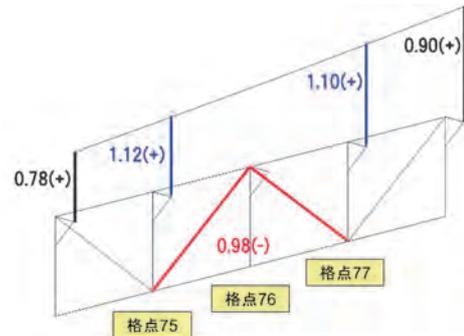
自動車荷重は、終日の交通規制を前提に、主載荷荷重を追越車線側に移動させた。これにより、東側のハンガーや主構が分担する荷重を低減した(表-6)。

表-6 低減活荷重
Table 6 Reduced live load

	建設時活荷重	低減活荷重
鉄道	(東)3.8t/m×370m ←貨物 (西)3.8t/m×370m ←貨物	(東)3.0t/m×460m+6.0t/m×17m ←貨物 (西)2.4t/m×140m ←旅客
自動車	(東) (西) 5500	(東) (西) 6000 (通行車線規制) 5500

5.3 低減活荷重による照査

低減活荷重を用いた全体解析では、主構斜材の照査NGは解消されたが、ハンガーの照査NGは解消できなかった(図-13)。建設時の設計荷重を用いた場合と比較した場合、主構斜材では約12%の低減、隣接ハンガー張力では約6%の低減する結果となった。ハンガーで低減効果が小さい理由として、荷重構成における活荷重が占める割合が小さいことが挙げられる。



* 記載の数字は、常時の許容値に対する超過度を示す。
* (+)は引張状態を、(-)は圧縮状態を示す。

図-13 低減活荷重による照査結果
Fig.13 Verification result based on reduced live load

5.4 照査NGの方策2(製作・架設誤差張力の低減)

活荷重の低減だけでは隣接ハンガー張力の照査を満足できなかった。そこで、追加の方策として、表-7の比較検討を行い、工程面、費用面及び施工性が最も優れている製作・架設誤差張力の低減(D案)を採用した。

誤差張力の低減(D案)は、実橋の誤差張力が設計で見込まれた誤差張力と比較して小さいとの見立てに基づいた方策であり、算出式及び概念図(図-14)を示す。

実橋の製作・架設誤差張力 = 実橋張力 - 設計死荷重

ここで、実橋張力とは、実橋計測値であり、死荷重張力と製作・架設誤差張力の合計値である。

次に格点77における製作・架設誤差張力(実橋相当値)の計算例を以下に示す。

実橋の製作・架設誤差張力 = 1872 - 1869 = 3[kN]

建設時の設計で見込まれた570kNの誤差張力は、実橋相当値で3kNとなり、大幅に低減できる結果となった。

なお、格点あたりの実橋張力は、1格点4本の張力計測から、4本のうち最も大きい張力を4倍して使用した。これは4本全てのハンガーが危険側の評価とならないようにするためである。

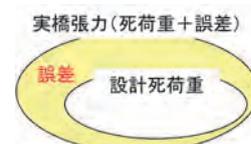
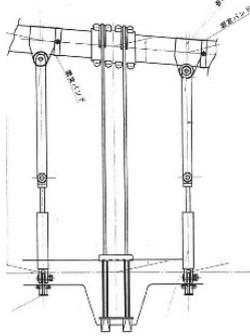
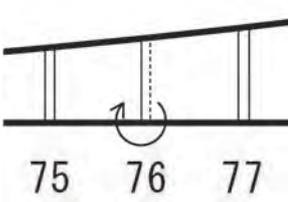
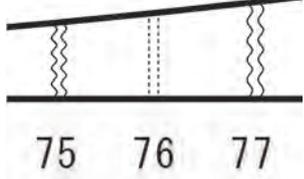
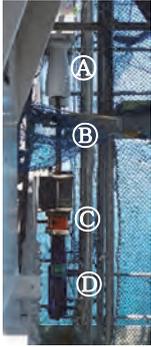


図-14 製作・架設誤差の概念
Fig.14 Concept of fabrication and erection errors

表一七 照査NGに対する方策の比較検討

Table 7 Comparison and evaluation of measures for addressing verification failure

A案 仮吊り	B案 1本残し	C案 隣接の張力調整	D案 製作・架設誤差張力の低減
 <p>仮ハンガー・仮バンドを製作し、事前に仮吊りする方法</p> <p>(実績) 因島大橋 短尺ロープ</p>	 <p>2本鞍掛けされているロープの内、1本を残す方法</p> <p>(実績) 大鳴門橋では、張力調整せずに照査満足</p>	 <p>隣接ハンガーの張力増加を抑制するために、隣接ハンガーを緩めながら支持する方法</p> <p>(実績) 明石海峡大橋では、張力調整せずに照査満足</p>	 <p>①ハンガーソケット ②テンションロッド ③荷重計 ④引き込みジャッキ</p> <p>実橋張力を計測し、誤差張力が設計より小さい場合、誤差張力を低減する方法</p>
<p>△国内外で実績があり、実現性は高いが、設計・製作に6か月以上必要となり、工期や工費が増大</p>	<p>△荷重偏心に伴いハンガーブラケットにねじり荷重が入る。概略計算では照査NG</p> <p>△残された1本の張力増加が大きいが、大鳴門橋と比較して安全余裕が小さいため、照査NG</p>	<p>△張力調整用の支圧板の製作・施工が必要</p> <p>△鉛直変位、水準変位が大きくなり、列車走行性を満足しない可能性</p>	<p>○テンションロッド、架台、荷重計及びジャッキが必要となるが、保有済み</p> <p>○振動法を用いた張力の簡易計測値から誤差張力の低減が期待可能</p>

表一八 隣接ハンガー張力の照査結果

Table 8 Verification result of adjacent hanger tension

格点	部位	項目	格点 76	死荷重	活荷重	温度変化	製作誤差	架設誤差	曲げ影響	クランプ	合計 [kN/格点]	許容張力 [kN/格点]	超過度	安全率
77	鞍掛部	①実施設計	撤去前	1,869	860	5	288	282	527	39	3,870	4,182	0.93	3.24
		②今回の解析 (建設時荷重)	撤去前	1,854	677	5	288	282	527	39	3,672	4,182	0.88	3.42
			撤去後	2,605	1,032	5	288	282	527	39	4,778	4,182	1.14	2.63
		③今回の解析 (低減活荷重)	撤去前	1,854	446	5	288	282	527	39	3,441	4,182	0.82	3.65
			撤去後	2,605	710	5	288	282	527	39	4,456	4,182	1.07	2.82
		④実橋張力を反映	撤去前	1,872	626	5	死荷重に含む		527	39	3,069	4,182	0.73	4.09
	撤去後		2,583	890	5	死荷重に含む		527	39	4,044	4,182	0.97	3.10	
	定着部	⑤腐食量を反映	撤去前	1,872	626	5	死荷重に含む		—	—	2,503	3,393	0.74	4.07
			撤去後	2,583	890	5	死荷重に含む		—	—	3,478	3,393	1.02	2.93

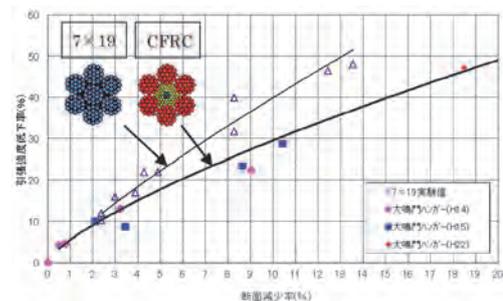
5.5 実橋張力及び腐食量を考慮した照査

製作・架設誤差の低減を考慮した場合、ハンガー撤去後の安全率が2.82から3.10まで改善した(表一八)。

他方、腐食したハンガーの引張強度の低下は著しいことが知られている。そこで、大きな張力の生じる隣接ハンガーの腐食量を、全磁束法を用いて計測したところ、断面減少率は5.43%であった。管理要領の強度低下曲線(図一15)に基づけば、およそ19%の強度低下していると想定される。この強度低下を考慮した場合、安全率は2.93となり、安全率3.0を満たすことができなかった。しかしながら、次の理由から取替施工を進めても問題ないと判断した。

理由1:管理要領では、材料のばらつきを考慮した場合、安全率を2.9まで緩和できるため。

理由2: H29道示³⁾、⁴⁾による部分係数設計法(限界状態1)を適用した場合、発生応力は制限値を下回ったため。



図一15 CFRCロープの断面減少率と引張強度低下の関係
Fig.15 Relationship between cross sectional reduction and strength loss of CFRC rope

5.6 解析の妥当性確認

格点76東側ハンガー撤去時に、格点75及び格点76のハンガー張力の計測を実施し、解析値と計測値の比較を行った(図-16)。死荷重状態でハンガー撤去した場合、解析値と計測値は同等の張力変動が見られたため、解析は妥当であったと考えられる。

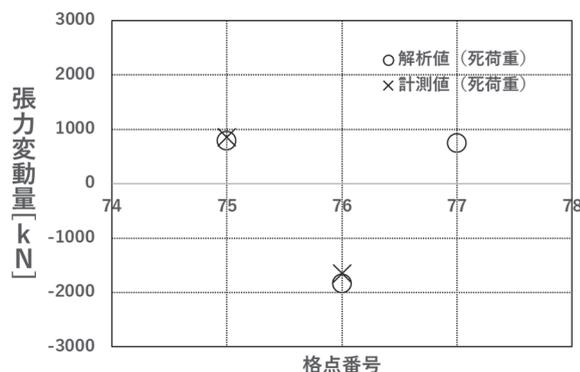


図-16 ハンガー張力の変動量
(=ハンガー撤去前-ハンガー撤去後)

Fig.16 Variation in hanger tension

6. まとめ

南備讃瀬戸大橋の格点76東側ハンガー取替えにあたって、列車走行性及び構造安全性の照査を行った結果を報告した。得られた結果を以下に示す。

(1) 列車走行性については、①角折れ、②水準変位(カント)、③通り変位に着目して、ハンガー撤去の影響は小さく、列車走行性に問題ないことがわかった。

ただし、実施工に際しては、万が一の鉄道インシデントを防止する目的で、鉄道事業者との連携を密に図り、ハンガー撤去による軌道変位の計測について必要性を検討する必要がある。

(2) 構造安全性については、実態の活荷重載荷条件や実橋のハンガー張力を考慮すれば、格点76東側ハンガーの撤去は、安全性に問題ないことがわかった。

7. おわりに

今回実施した一連の安全性照査から、ハンガー取替えを実施する上で以下のような改善の余地があると考えられる。

(1) 取替工法の見直し

今回の照査は、隣接ハンガーの腐食量や製作・架設誤差といった不確定な要素に依存する照査方法である。今後、腐食量が大きい場合に、照査を満足できないケース

も想定される。

そのため、確実に照査を満足できる仮吊り工法(表-7, A案)の採用が考えられる。仮吊り設備を一度設計・製作すれば他の格点でも使用できるメリットがある一方、施工手間は大きくなるため、設計・施工の両面から合理的な取替工法を検討する必要がある。

(2) 限界状態設計法の適用

今回の照査で用いた安全率は、供用時と同じ安全率である。また、その安全率は橋梁の状況によらず一意的に定められた値である。施工期間が短期であること、荷重条件が自動車と鉄道であること及び長大な吊橋形式であること等を考慮した部分係数の設定、並びに限界状態設計法の適用を行えば施工時の安全率(安全余裕)を低減できる可能性がある。

謝辞

本安全性照査には、本四高速道路ブリッジエンジニア島保全センターの現場協力、及び同社技術アドバイザーの山本晃久氏からご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 古川 敦：鉄道軌道のメンテナンス，セイフティ・エンジニアリング，178号，pp. 4-9，2015. 3
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 鋼橋編，pp. 130，2012. 3
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 共通編，2017. 11
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 鋼橋・鋼部材編，2017. 11

LPWA無線ひずみ計測による遠隔監視手法の実践

Practical implementation of remote monitoring method using LPWA wireless strain gauging

栄 翔太 Shota Sakae

長大橋技術部
技術革新・アセットマネジメント課

藤田 憲二 Kenji Fujita

長大橋技術部
技術革新・アセットマネジメント課長

後藤 稜平 Ryohei Goto

本四高速道路ブリッジエンジニアリング(株)
技術事業本部 技術開発部 技術2課

概要

本州四国連絡高速道路(株)では、膨大な部材数を有する長大橋の維持管理の高度化、効率化を目指している。その中でも近年発達してきたIoT技術によるモニタリングを活用し、目視点検や近接が困難な部材の常時遠隔監視に着目した。この技術のメリットとして、遠隔監視が可能であることや、データの蓄積が可能であることが挙げられる。そのため、従来の間欠的な点検では把握が困難である部材の損傷の早期発見や損傷予測が可能になると考えた。そこで、過去に損傷事例のある来島海峡第一大橋のセンターステイロッドを対象として、計測機器を設置し、常時遠隔監視を実施した結果について述べる。

The Honshu Shikoku Bridge Expressway Company aims to enhance and streamline the maintenance and management of long-span bridges, which consist of a large number of components. In particular, the company has focused on utilizing IoT-based monitoring technology, which has advanced in recent years, for continuous remote monitoring of components that are difficult to inspect visually or in close proximity. The advantages of this technology include the ability for remote monitoring and the possibility of data accumulation. As a result, it is believed that early detection of component damage and damage prediction, which would be difficult to achieve through traditional intermittent inspections, can be realized. This paper describes the results of remote monitoring conducted continuously by installing measurement equipment on the center stay rod of the 1st Kurushima Kaikyō Bridge, which had a history of damage incidents.

1. はじめに

本州四国連絡高速道路(株)(以下「本四高速」という。)では、17橋の長大橋の維持管理を行っている。しかし、長大橋は構造が複雑かつ部材数が多く、海上部に橋梁があることから接近手段が限られるなど点検業務に多くの時間を要している。そのため、本四高速では技術開発や共同研究、コンソーシアム活動等に取り組み、長大橋維持管理の高度化、効率化を目指している。その1つとしてIoT技術を活用した、目視点検や近接が困難な部材の遠隔監視に着目しており、近年では疲労亀裂に対してIoT技術を活用したモニタリングが提案されている¹⁾。これらの方法には、遠隔監視が可能、点検の省力化、データの蓄積が可能などのメリットがあり、従来の間欠的な点検では把握が困難である部材の損傷の早期発見や損傷予測が可能になると考えた。そこで、遠隔監視手法として文献2)、3)で提案されている、荷重が作用していないときの静ひずみ計測を用いて、内部の力のつり合いの変化によって損傷を検知する手法を適用し、吊橋の損

傷検知を実施した。計測機器の設置箇所としては、過去にセンターステイロッド(以下「ロッド」という。)が疲労により損傷した事例がある来島海峡第一大橋の上り線今治側と下り線今治側のロッドとした。

本技報では、点検を省力化し、かつ低コストで亀裂の発生、進展、破断を早期に把握するため、遠隔監視により、ロッドの静ひずみ計測を実施した結果について述べる。

2. 計測機器設置背景と設置箇所

2.1 来島海峡第一大橋

来島海峡第一大橋は、中央支間長600mの3径間2ヒンジ補剛箱桁吊橋で、主塔高さが異なる非対称構造の橋梁である。補剛箱桁の断面は、偏平六角形箱桁であり、橋梁上では車線数が今治側の完成4車線から大島側の暫定2車線へと、大島側で下り線側に偏載される構造である。

センターステイは吊橋全般に設置されている部材であり、本橋梁では、強風時に補剛桁と主ケーブルとの橋軸

方向の相対変位を抑制することにより、ハンガーロープに曲げ等の付加的な応力が発生するのを防ぐことを目的としてセンターステイが中央径間中央部に設置されている。図-1に示すように、ロープ、ロープ側ソケット(カプラー付)、ロッド、桁側ソケット(カプラー付)、定着部から構成され、上下線各2本、計4本設置されている。

本橋梁のロッドは、大規模地震時には主ケーブルに過大な地震力が伝わらないようにすることを目的に図-2に示すロッド中央の最小断面部であるA断面で破断するように設計されており、ロッドの交換が可能な両側ねじ構造でロープ側ソケット及び桁側ソケットに接合される構造となっている。ねじ形状はTr60の台形ねじ(ねじ底半径 $R = 0.3\text{mm}$)であり、ロッドの材質はSNCM625(ニッケルクロムモリブデン鋼、引張強さ 930N/mm^2)である。2001年3月24日に発生した芸予地震(M6.7)では、おおむね設計で想定したとおりに破断した⁴⁾。

2.2 ロッドの疲労破断事例

センターステイは斜めに配置する構造であるため、ロープサグの影響を受けロッド部では曲げ応力が作用し、2014年に下り線側の2本において、ロープ側カプラーとかみ合う1山目のねじ底部で疲労破断が生じた(写真-1)⁵⁾。破断位置は、今治側、大島側ともに、ロープ側カプラーとかみ合う1山目のねじ底部であり、設計で想定している大規模地震時にロッド中央部の最小断面部で破断する破壊形態とは異なっていた。

破断要因の解明のため、写真-1に示す破断したロッドのうち、大島側の破断ロッドに対して破断面のマクロ観察及びSEMによるミクロ観察を行った。破断面の観察の結果、起点は下側(以下「地側」という。)ねじ底のR部であり、微細な割れは確認されなかった⁵⁾。また、文献5)のFEM解析の結果から、ねじ底R部で応力集中が発生することが明らかとなっており、ねじ底のR部を起点として繰返し応力の作用により、疲労亀裂が発生・進展し、最終的に減少した断面が引張力に耐えられなくなり、破断したと考えられる。そのため、ロッドの亀裂の起点となるねじ底の半径Rを拡大して応力集中を低減させる改良を行い、2017年12月には来島海峡第一大橋の4本のロッドを $R = 0.7\text{mm}$ に改良したロッド(以下「改良ロッド」という。)に置換している^{5) 6)}。このとき、破断していなかった2本のロッドは、交換した改良ロッドが破断した際に備えて予備品として保管することとした。しかし、後に実施した72時間の応力頻度計測結果から、活荷重により大きな応力変動が生じることが確認されたため、改良ロッドにおいても疲労亀裂が発生する可能性があった。そのため、供用中の改良ロッドに生じる疲労亀裂を確実に発見するための手法として、超音波探傷を用いた検査方法を考案し⁹⁾、5年に1度程度の頻度で調査を実施することとした。

2024年に実施した調査において、上り線の今治側ロッドで疲労亀裂の発生、下り線の今治側ロッドで疲労破断

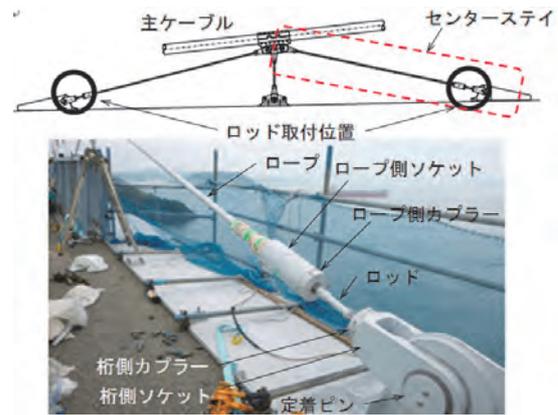


図-1 センターステイの構成

Fig.1 Composition of the center stay

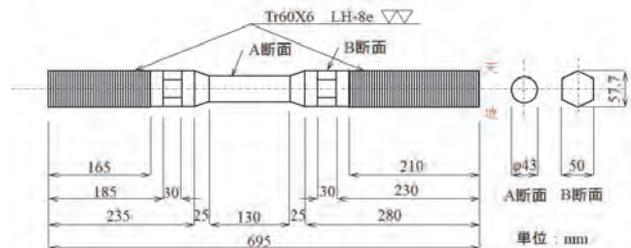


図-2 センターステイロッド

Fig.2 Center stay rods



写真-1 センターステイロッドの破断状況

Photo 1 Fracture condition of the center stay rod

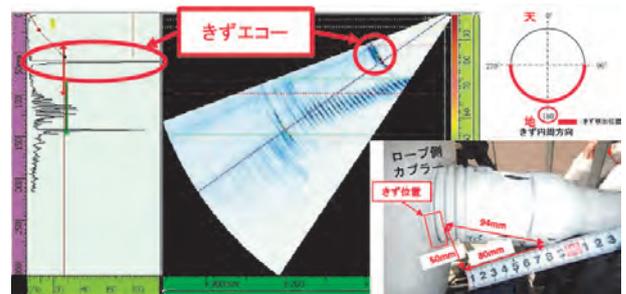


図-3 上り線今治側の改良ロッド点検結果

Fig.3 Inspection results of the improved rod on the uphill line, Imabari side

の発生を確認した。図-3に示すように上り線側の疲労亀裂はロッドの地側のねじ底から発生し、断面の半分程度まで進展していることを確認した。疲労破断した下り線側は予備品に交換したが、破断に至っていない上り線側では交換するための予備品がなく、新規にロッドを製作、交換することとした。このため、交換を行うまでの間に亀裂が進展し、破断に至る可能性があることから、監視が必要な状況であったが、ロッドにはカバーが設置されているため、間欠的な点検等では亀裂の進展、破断

を早期に把握することが困難である。ロッドには、活荷重や風荷重により圧縮力が作用した際に張力抜けが生じないように、設置時に約250kNの張力を導入している。このため、ロッドに亀裂の発生及び進展があれば断面内の応力状態に変化が生じ、破断することで張力が解放されることになる。したがって、これをIoT技術を活用したモニタリングにより遠隔監視することで、亀裂の進展や破断を把握できる可能性があると考えた。そこで遠隔監視手法として文献2), 3)で提案されている、荷重が作用していないときの静ひずみ計測を用いて、内部の力のつり合いの変化によって損傷を検知する手法を適用し、計測機器を上り線今治側と下り線今治側に設置し、ひずみの遠隔監視を実施した。

2.3 ひずみ計測位置

ひずみの計測位置は、図-4に示すように、上下線共に今治側のロッドの最小断面の中央とし、上側(以下「天側」という。)(U)と地側近く(L)とした。地側は、ロッドのカバーを取り外さずに設置することとなったため、完全な地側へのゲージの貼付ができなかったことから、できる限りロッドの地側に設置することとし、地側から約60°の位置とした。ひずみゲージの設置状況を写真-2に示す。バッテリーボックスとデータロガーはロッドのカバー内に設置しているが、アンテナもカバー内に配置すると通信不良が懸念されることから、アンテナの先端のみカバーの隙間から外に出している。

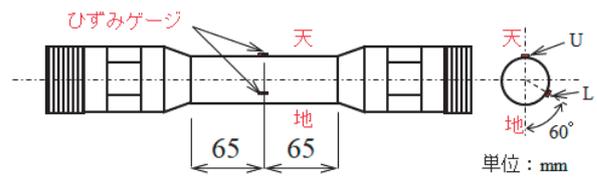


図-4 ロッドのひずみ計測位置

Fig.4 Strain measurement locations of the rod

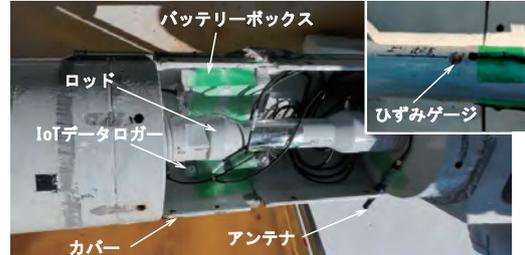


写真-2 ロッドのひずみゲージの設置状況

Photo 2 Installation condition of the strain gauges on the rod

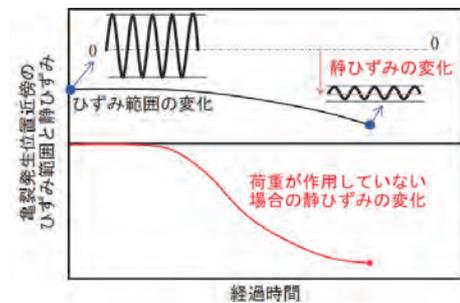


図-5 無荷状態の静ひずみの変化のイメージ図

Fig.5 Imaginary diagram of static strain change in an unloaded condition

3. 静ひずみの変化による損傷の検知手法

3.1 損傷の検知手法

文献2), 3)では、活荷重が作用していない状態の静ひずみの変化を計測し続けることで、疲労亀裂の発生・進展を評価する方法が提案されている。この方法では、疲労亀裂の発生により、溶接部とその近傍に導入されている残留応力が解放されることによって残留応力のつり合いが変化することによるひずみの変化に着目している。このため、一般的な疲労亀裂の検出に用いられるひずみ範囲(あるいは応力範囲)の変化を動ひずみで計測する必要がないこと、一定の荷重を一定の位置に载荷させる必要がないことなどから、静ひずみの変化が実橋の疲労亀裂検出に適した指標となる。荷重が载荷されていない状態の静ひずみによる亀裂検出のイメージを図-5に示す。ひずみ範囲の変化を用いて疲労亀裂の発生の有無を評価する場合、常に一定の荷重範囲を与える必要があるが、残留応力の解放によるひずみは、数日に1度、数秒程度、静的にひずみを計測するだけで、疲労亀裂の発生の有無が評価でき、LPWA(Low Power Wide Area)を用いたIoTによるモニタリングに適した指標である。LPWAは、無線通信規格の一種であり、1度に通信できるデータ量に制限があるが、低速な狭帯域を利用することで10kmを超える長距離通信⁷⁾が可能であり、低電力消費であるため



写真-3 IoT データロガー機器構成

Photo 3 IoT data logger device

IoT機器の長期間の稼働に適していることが特徴である。

3.2 IoTデータロガーの構成とモニタリング方法

計測で用いたIoTデータロガーの機器構成を写真-3に示す。シングルボードコンピュータArduino Nano(互換機)を用い、ひずみの計測にロードセル用24ビットADコンバーターHX711、通信にはLPWAの一種であるSigfox(breakout board)を用いた。Sigfoxは、アンライセンスバンドの一種であり、日本では免許や登録が不要なサブギガ帯域である920MHzを利用し、通信可能エリアであ

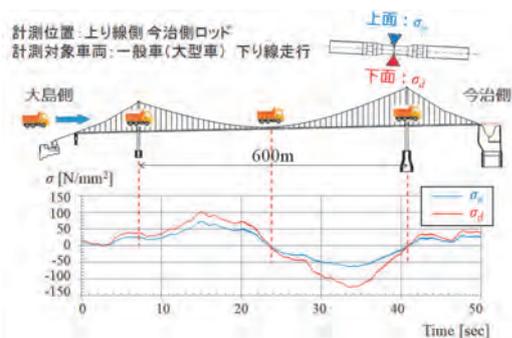


図-6 センターステイの張力の鉛直荷重に対する計測データ
Fig.6 Measurement data of the center stay tension against vertical load.

れば、基地局やゲートウェイを準備する必要がなくWeb上へデータを送信でき、対応デバイスが低コストで導入しやすいことが特徴である。また、バッテリーボックスには単3型のバッテリーを12本内蔵し、5年間以上稼働が期待できる仕様とした。

計測機器には、ひずみデータが計測できるように、HX711を用いた。また、ひずみを計測する際に、ゲージ長1mmのひずみゲージ(350Ω)を3線式結線法(リード線の温度影響の補償法)で接続するため、許容誤差±0.1%、温度係数±5ppm/°Cの350Ω金属皮膜抵抗器(VISHAY社製)で、ひずみゲージブリッジを組み、端子台で接続できるようにした。今回製作したIoTデータロガーでは、計測できるひずみ範囲が-8,000μ~8,000μ、計測速度は80Hz、スパイクノイズを除去するためのフィルターとしてMedian Filterを用いた。各チャンネルに対してそれぞれ3つのデータを取得してその中央値を抽出(Median Filter)し、それを10回繰返して得られた各チャンネルの10回の中央値のうちの最大値と最小値を抽出してデータ送信を行った。したがって、上記のひずみ計測を行っている間(2チャンネルの場合約0.8秒の間)に車両通行によりひずみに寄与する荷重が作用した場合は、無荷重時のひずみに加えて荷重作用時のひずみが含まれる。そのため、タイマーモジュールを用いることで、2時間程度に1度IoTデータロガーが起動するが、夜間(23又は24時台)、早朝(4又は5時台)及び昼間(セットした時の確認用で14又は15時台)の1日に2~3回データを送信するようにセットした。

センターステイの張力の鉛直荷重に対する計測データを図-6に示す。同図は、大型車を下り走行車線に走行させたときの上り線今治側のロッドの天地の応力波形である。センターステイの張力に影響する荷重範囲は広く、完全な無荷重状態の張力を計測できる瞬間をあらかじめ予測することは困難であるが、夜間と早朝の比較的交通量の少ない時間帯に計測を実施し、できる限り無荷重時のひずみを取得することに努めた。

IoTデータロガーに温湿度計(DHT11)をセットし、計測器の設置位置の温度変化も計測するとともに、電圧を監視することで、バッテリーの劣化も把握できるようにした。また、WEBプラットフォームとして、計測データ



写真-4 事務所からの遠隔監視の様子
Photo 4 The remote monitoring from the office



図-7 Ambientでセッティングした画面の一例
Fig.7 An example of a screen set up with Ambient

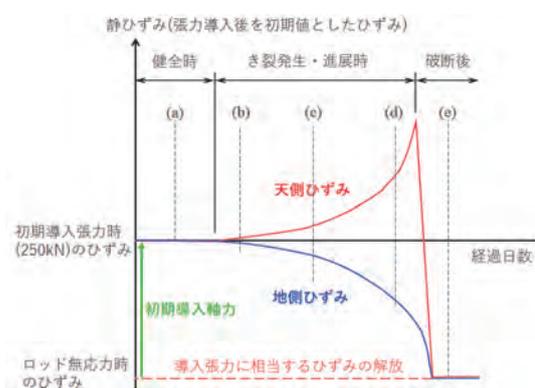


図-8 亀裂発生、進展による静ひずみの変化のイメージ
Fig.8 Imaginary change in static strain due to crack initiation

を蓄積し、可視化できるAmbientを利用し、写真-4のとおり、事務所で遠隔監視を定期的に行った。Ambientの画面は図-7に示すように、計測位置とともに最大・最小のひずみ計測結果、計測機器設置位置の温度、バッテリーの電圧の時刻歴波形を確認できるようにセッティン

グした。なお、Ambientの画面では、ひずみデータの初期値を完全に0に設定できていないが、後のデータ整理では、荷重が作用していない計測初期の値を0として評価した。

4. モニタリング結果

4.1 ロッド破断の判断方法

図-8に亀裂発生、進展し、破断に至る場合までの静ひずみの変化のイメージ図を示す。図-8の状態(a)では、ロッド設置時に250kN程度の張力を導入しており、天地のひずみ差はゼロである。状態(b)に示す亀裂発生初期は天地のひずみ差が小さく、亀裂の進展に伴い状態(c)、(d)に示すようにひずみ差は大きくなる。ロッド破断後の状態(e)では天地のひずみ差がゼロとなり、初期張力分のひずみが圧縮側に現れるものと考えた。したがって、状態(e)のデータを取得した場合に、ロッドが破断したと判断することとした。

4.2 ロッドの静ひずみの変化

モニタリングした静ひずみと温度の結果を図-9、10に示す。図-9には、ロッドの天側、地側で1日2~3回の計測データ(早朝、昼間、夜間)におけるそれぞれの最大・最小のひずみ U_{max} 、 U_{min} 、 L_{max} 、 L_{min} をプロットしている。加えて、比較的交通量が少なく、多くのデータで無荷重時のひずみに近い値が得られることが期待できる夜間(23又は24時台)に計測された最小のひずみ $U_{min}(0)$ 、 $L_{min}(0)$ を実線で示している。図-10の温度は、 $U_{min}(0)$ 、 $L_{min}(0)$ に対応する夜間に計測された温度を示しており、上下線ではロッドのカバー内の温度に大きな変化がないことがわかる。また、図-9において、最大・最小の静ひずみの計測結果に着目すると、各計測時における U_{max} と U_{min} 、 L_{max} と L_{min} のプロットはほぼ重なっており、計測している約0.8秒間程度の間ではひずみの変化がほとんどないことがわかる。これは、ロッドの変動張力は衝撃的に作用するのではなく、橋全体系の挙動に起因するものであることが理由として考えられる。

図-9(a)に示す、既に疲労亀裂が発生している上り線側のロッドの静ひずみは、IoTデータロガーをセットしてから22日後には、天と地のひずみ値の関係が逆転し、天側で引張ひずみに、地側で圧縮ひずみとなった。これは、センサー設置時に比べて亀裂が進展したことが要因であると考えられる。また、セットしてから40日後には $U_{min}(0)$ が急上昇し、 $L_{min}(0)$ が急降下し始めたことが確認された。そのため、2024年7月12日に点検を実施し、ロッドのカバーを確認した。この時点では、カバーにずれがなくロッドは破断していない状態であることを確認した。7月15日の夜間以降、計測された $U_{min}(0)$ に急低下が確認され、合わせて $L_{min}(0)$ の低下も確認された。したがって、再度、7月16日に点検を実施したところ、カ

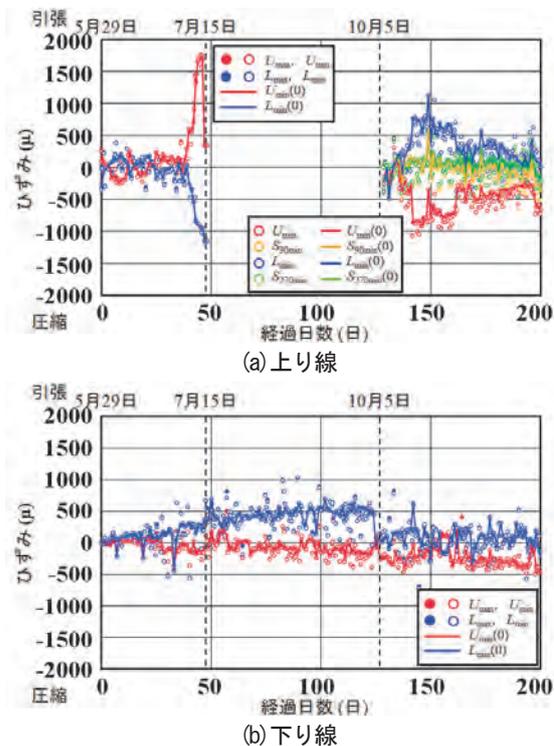


図-9 ロッドの静ひずみ計測結果

Fig.9 Static strain measurement results of the rod

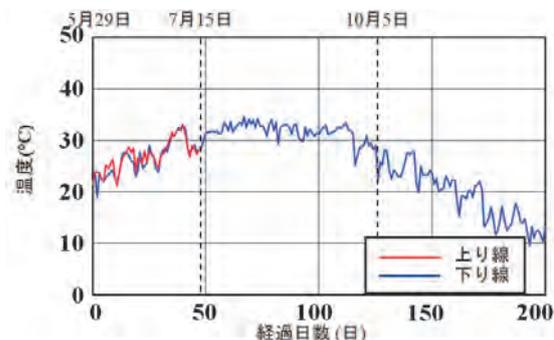


図-10 ロッドの温度変化

Fig.10 Temperature change of the rod

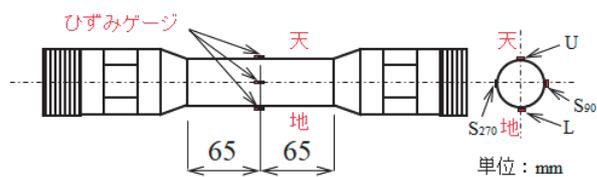


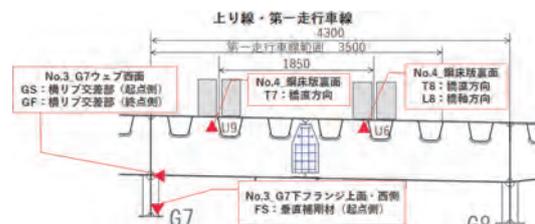
図-11 ロッド復旧後ひずみ計測位置

Fig.11 Strain measurement locations after rod restoration

バーにずれが生じていたため、カバーを取り外してロッドの状況を確認したところ、破断していることを確認した。その後、10月1日にロッドを交換し、10月5日にIoTデータロガーを設置した。ただし、ロッド復旧後のカバー取付前であったことから、図-11に示すようにロッドの4方向にひずみゲージを貼付け、遠隔監視を再開した。

図-9(b)に示す損傷がないロッドに取り換えた下り線

側のロッドの静ひずみは、計測開始以降、徐々に $U_{min}(0)$ と $L_{min}(0)$ に差が生じ始めたが、セットしてから125日後には突如差が減少した。この要因としては、温度が計測開始時期と同程度になったことや、上り線側のロッドが復旧したためであると考えられる。しかし、解析などによる精査を実施していないため、引き続きデータを蓄積し考察することで、要因が明らかになると考えている。



図一12 明石海峡大橋でのひずみ計測箇所

Fig.12 Strain measurement locations of the Akashi Kaikyō Bridge

5. おわりに

静ひずみをIoTデータロガーで計測し、WEBプラットフォームで遠隔監視を実施した結果、以下の知見を得た。

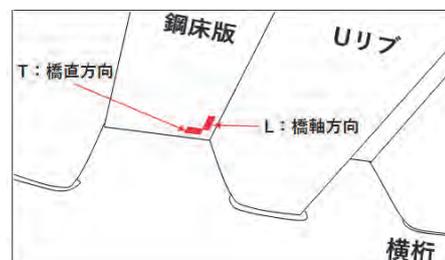
- 1) ロッドの静ひずみの遠隔監視を行うことで、破断に伴いあらかじめ導入された張力が解放されて生じるひずみの変化について検知が可能である。
- 2) ロッドの軸方向の天、地側で静ひずみの監視を行うことにより、ロッド内の疲労亀裂の進展とひずみの変化の関係性は明確ではないが、センターステイロッドの破断直前の兆候をモニタリングできた。
- 3) 昼間の計測データは、車両の走行による影響を受けるため、夜間に計測された静ひずみに比べて、変動が大きく、挙動や傾向を把握する目的では、夜間や早朝など、比較的走行車両が少ない時間帯のみの計測を行うことで良いといえる。

今回用いた機器は低コストで導入しやすく市販の単3型バッテリーで5年程度の遠隔監視が可能であり、鋼橋での疲労亀裂検出に有望な技術であると考えられる。また、図一12に示すように明石海峡大橋1A上屋道路桁を対象に、疲労亀裂の発生事例が多く報告されている構造であるデッキプレートの上り線第一走行車線の車輪直下の2箇所(図一13)と、図一14に示す疲労強度等級の低い面外ガセット継手部2箇所、荷重非伝達型十字溶接継手1箇所へ2024年6月20日に計測機器を設置し、遠隔監視を開始している。年間のデータを取得し、亀裂発生を検知や温度変化による影響が明らかとなれば報告したいと考えている。

今回の実践から、損傷の発生、進展により断面内の応力性状が変化する部材を対象に損傷の早期発見のために用いることが可能であると考えられる。引き続き遠隔監視を実施し、計測データの蓄積に努めていく。

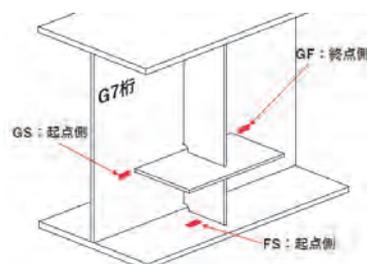
謝辞

本研究は、本四高速と学校法人関西大学、本四高速道路ブリッジエンジニア(株)との共同研究の一環として実施したものである。関西大学環境都市工学部石川敏之教授に貴重な助言をいただくとともに、環境都市工学部都市システム工学科構造工学研究室の石井翔大氏、折戸千紘氏に多大な協力をいただいた。ここに記し、感謝の意を表す。



図一13 デッキプレートのひずみ計測位置

Fig.13 Strain measurement locations of the deck plate



図一14 ガセットプレートのひずみ計測位置

Fig.14 Strain measurement locations of the gusset plate

参考文献

- 1) 齋藤豪, 安川和利: 専用断線ゲージを用いた疲労亀裂進展の遠隔監視手法の検討, 令和元年度土木学会全国大会第74回年次学術講演会, I-205, 2019.
- 2) 石川敏之, 松本直樹: 疲労亀裂の発生・進展による無荷重時のひずみ変化の評価, 構造工学論文集, Vol.68A, pp.554-563, 2022.
- 3) 松本直樹, 石川敏之, 公門和樹, 上田尚史: LPWAを用いた疲労亀裂検知モニタリング手法の開発, インフラメンテナンス実践研究論文集, Vol.3, No.1, pp.62-71, 2024.
- 4) 古家和田彦, 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イ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.
- 5) 小河正次, 梶尾光邦, 溝上善昭: 来島海峡第一大橋のセンターステイロッド破断の原因究明と対応, 本四技報, Vol.40, No.125, pp.41-47, 2015.
- 6) 山本大道, 日高裕司, 奥村淳弘: センターステイロッドの疲労耐久性向上及び合理的点検手法の考案, 本四技報, Vol.43, No.132, pp.15-22, 2019.
- 7) 総務省: 平成30年版情報通信白書, p.13, 日経印刷, 2018.

孫崎高架橋の応力計測と疲労耐久性評価

Stress measurement and fatigue durability evaluation in Magosaki viaduct

横井 芳輝 Yoshiteru Yokoi

(前)長大橋技術部
技術革新・アセットマネジメント課
担当課長

田村 拓登 Hiroto Tamura

長大橋技術部
技術革新・アセットマネジメント課

木内 愛理 Eri Kinouchi

(前)鳴門管理センター 保全課

概要

孫崎高架橋は荷重分配横桁と主桁との交差部において疲労耐久性の低い継手が用いられている。疲労に対する予防保全対策の必要性を確認するため、解析と現地応力計測を行い、疲労耐久性の評価を行った。この結果、実橋に発生する応力範囲は小さく、疲労に対しては十分な耐久性を有することがわかった。これは、設計は非合成桁であるが、実働荷重下では合成桁に近い挙動をしていること、横桁、対傾構による荷重分配効果が高いことによるものであることが分かった。

The joints between the cross beams for load distribution and the main girders of the Magosaki Viaduct has low fatigue durability. To assess the necessity of preventive maintenance measures against fatigue, an analysis and field stress monitoring were conducted to evaluate its fatigue durability. The results indicated that the stress range experienced by the viaduct is small, and the bridge has sufficient durability against fatigue. Additionally, it was confirmed that, although the design is based on non-composite girders, the bridge behaves similarly to a composite girder under live load. This is attributed to the high load distribution effect provided by the cross beams and the cross frames.

1. はじめに

鋼材の疲労とは材料の降伏応力よりも低い応力であっても繰り返し作用することで亀裂が生じ進展する現象である。亀裂が進展すると最終的には部材が破断し、鋼橋の安全性に大きく影響を及ぼすため、鋼橋の維持管理においては重要な課題である。本州四国連絡高速道路(以下「本四高速道路」という。)の長大橋については、道路鉄道併用橋である瀬戸大橋や大鳴門橋の建設にあたり、列車荷重の繰り返し作用に対する疲労対策について多くの検討がなされ、その設計製作に反映されている。一方で、陸上部道路橋では一部の構造詳細を除き疲労に配慮した構造とはなっていない。なお、道路橋の技術基準である道路橋示方書(以下「道示」という。)において疲労の影響を考慮することが規定されたのは2002年であり、これは本四道路の全ルート供用後となる。

これまで本四高速道路における鋼橋の疲労事例としていくつか報告はある^{2) 3)}が、他機関に比べて比較的供用年数が短く、大型車交通量の累積が少ないことから疲労損傷の発生数は少ない。しかし、今後、経過年数に伴い累積大型車交通量が増加することで、疲労損傷の発生数も増えていくことが懸念される。このため、疲労に関す

る専門的知識を有する社員の育成も目的として疲労対策チーム⁴⁾を設け、疲労に関する業務を遂行しているところである。

我が国における鋼桁橋の疲労損傷事例のうち重大な損傷事例の一つに、2006年10月に発見された国道25号山添橋の事例がある⁵⁾。この損傷は横桁下フランジが主桁ウェブを貫通する部位(以下「ウェブ貫通構造」という。)から、主桁ウェブに1mを超える疲労亀裂が発生したものである。この構造は、主桁ウェブにスリットを設けて横桁下フランジを貫通させ、フランジの片面のみが主桁ウェブにすみ肉溶接された構造ディテールであった。この構造は主桁の曲げ変形により溶接部に発生する大きな局部応力に対して十分な疲労強度を有する構造となっていないため、この継手の疲労強度等級は面外ガセット溶接継手よりも2等級低いH等級とされている。この構造と同様又は類似の構造を採用した橋は本四高速道路にも存在しており、十分に注意して維持管理を行っていく必要がある。今回、疲労対策チームの活動として、孫崎高架橋を対象にH29道示⁶⁾に基づいた疲労照査を行うとともに、現地での72時間計測による疲労耐久性評価を行ったため、これについて報告する。

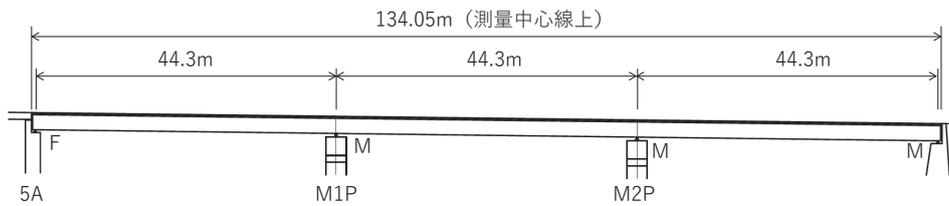


図-1 橋梁一般図

Fig.1 General drawing

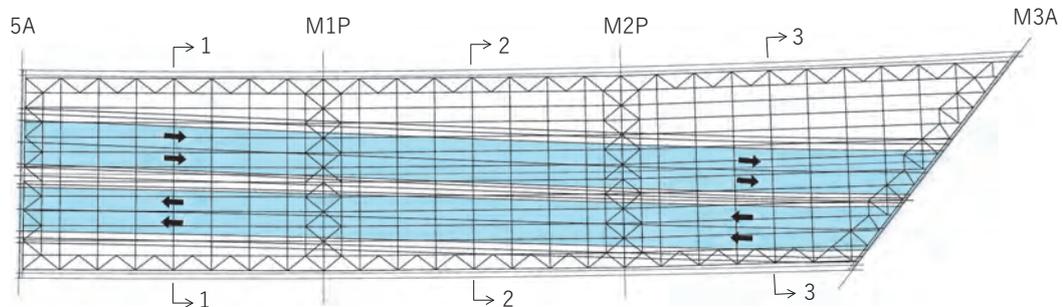
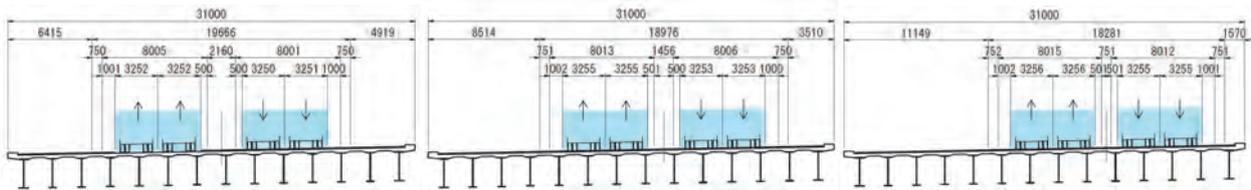


図-2 暫定車線位置図(平面図)

Fig.2 Floor plan of temporary lane location



(a) 1-1 断面

(b) 2-2 断面

(c) 3-3 断面

図-3 暫定車線位置図(断面図)

Fig.3 Cross section of temporary lane location

2. 対象橋梁

孫崎高架橋は、1985年に供用された大鳴門橋の四国側に隣接する3径間連続非合成鈹桁橋である。図-1に橋梁一般図を示す。橋長は134mであり、支間長は44.3mとなっている。本橋は6車線完成系の幅員で建設されているが、現在は4車線の暫定系で運用されており、車線がシフトする区間に位置することから、橋軸方向の位置によって輪荷重の影響を受ける主桁が異なるという特徴がある。また、終点側端部のM3A橋脚では交差道路(県道11号)との関係から50°の鋭角な斜角が付与されている。図-2及び図-3に暫定車線位置図を示す。本橋は将来の鉄道空間からの制約により桁高が2.2mと低く抑えられ、14本の主桁が2.2mと狭い主桁間隔で配置される多主桁構造となっている。また、防食対策として2018年に防食防護工が設置されている⁷⁾。

本橋の対傾構と横桁は設計上、荷重分配効果が考慮されており、対傾構は5.6m間隔に配置され、支間中央には充腹断面の横桁(荷重分配横桁)が配置されている。この荷重分配横桁と主桁との接合部において、主桁ウェブ



図-4 孫崎高架橋のウェブ貫通構造

Fig.4 The web penetrated joint design of Magosaki viaduct

にスリットを設けて横桁フランジを貫通させるウェブ貫通構造が採用されている。本橋では横桁上フランジの下面と主桁ウェブ、横桁下フランジ上面と主桁ウェブがすみ肉溶接により接合された構造となっている。本橋のウェブ貫通構造を図-4に示す。同図には、鋼道路橋疲勞設計便覧⁸⁾に記載のウェブのスカラップ形状の例から、当該橋梁に該当の形状を参考までに示している。なお、同図の写真は、塗膜を除去した状態の写真を示している。

表-1 照査対象継手

Tabel 1 Target joints of the evaluation

No.	評価対象継手及び部位		継手形式	上下位置	疲労強度等級
①	主桁フランジ	垂直補剛材	すみ肉溶接による横方向荷重非伝達型十字溶接継手/止端非仕上げ	上	E
②				下	E
③	主桁ウェブ	垂直補剛材	すみ肉溶接による横方向荷重非伝達型十字溶接継手/止端非仕上げ	上	E
④				下	E
⑤	主桁ウェブ	水平補剛材/横構ガセット	すみ肉溶接した横方向面外ガセット溶接継手 (フィレットなし) /l>100mm/止端非仕上げ	上	G
⑥				下	G
⑦	主桁ウェブ	荷重分配横桁フランジ	すみ肉溶接による横方向面外ガセット溶接継手 (主板貫通 (スカラップあり))	上	H'
⑧				下	H'

3. 疲労照査

疲労照査はH29道示に基づき行った。照査は、当該橋梁に用いられている溶接継手について調査したうえで疲労強度等級がE等級以下となる継手のうち、表-1に示す8種類の継手を対象とした。疲労照査に用いる応力範囲は格子解析モデルにより疲労設計荷重(F荷重)を各車線の中央の進行方向に移動荷重して得られる変動応力により求めた。解析モデルは、主桁、横桁、対傾構から構成される平面格子モデルとし、主桁は当初設計と同じ非合成桁として評価する場合に加えて、実際の橋の挙動に近いと想定される床版との合成効果を考慮する合成桁とみなす場合も計算した。合成桁断面では、道示で規定されるコンクリート床版の有効幅を適用し、鋼とコンクリートのヤング係数比を7とした。荷重を載荷する車線位置は、暫定供用の車線位置とした。

その他の疲労照査条件について以下に述べる。

①日大型車交通量

2021年度末までの交通量については、大鳴門橋の供用開始からの車種別年間交通量の累積大型車交通量を用いることとし、2021年度以降は新型コロナウイルス感染症の影響を受ける前の2019年度の日大型車交通量から変化しないと仮定した。また大型車交通量は大型車と特大車の交通量の合計とし、中型車は含めていない。2019年度の日当たりの日大型車交通量(ADTT)は2,665(台/日・方向)であった。

②車線交通量の偏り

大鳴門橋は片側2車線で供用しており、大型車交通量は追越車線に比べて走行車線に多い。本橋における過去の走行実態調査の例では走行車線と追越車線の大型車の走行比率は8:2程度であることが分かっているため、これを採用した。

③変動応力の補正

F荷重の移動荷重により求めた変動応力には、次式により得られる変動応力補正係数 γ_F を考慮した。

$$\gamma_F = \gamma_{F1} \cdot \gamma_{F2} \cdot \gamma_{F3} \cdot (1 + i_f) \cdot \gamma_a \quad (1)$$

ここに、

γ_{F1} : 同時荷重等補正係数1(=3.0)

γ_{F2} : 同時荷重等補正係数2(=1.0)

γ_{F3} : 同時荷重等補正係数3(=1.0)

i_f : 動的作用の影響を補正するための係数

$$i_f = 10 / (50 + L) \quad (2)$$

L : 衝撃係数を求めるときの支間長(m)

γ_a : 計算応力補正係数(=0.8)

④載荷頻度の補正

疲労照査に当たって考慮する1日あたりのF荷重の載荷頻度は次式に基づいて算出する。

$$nt_i = ADTT_{SLi} \cdot \gamma_n \quad (2)$$

ここに、

nt_i : 1日あたりのF荷重の載荷頻度

$ADTT_{SLi}$: 一方向一車線(車線i)当たりの日大型車交通量(台/(日・車線))

$$ADTT_{SLi} = ADTT / n_L \cdot \gamma_L \quad (3)$$

n_L : 車線数(=2.0)

γ_L : 車線交通量の偏りを考慮するための係数(走行車線=1.6, 追越車線=0.4)

γ_n : 頻度補正係数(=0.06)

その他、道示に従い、平均応力(応力比)の影響について考慮した。疲労照査の手順は次のとおりである。まず、算出された応力範囲を基に、一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界による照査を行った。次に、一定振幅応力に対する打ち切り限界以上となる場合、線形累積被害則に基づく照査を行った。この時、変動振幅応力に対する応力の打ち切り限界以下の応力範囲についてはその影響は無視して累積疲労損傷比を算出した。

非合成桁として照査した結果について表-2に示す。ここでは着目継手に対し、全照査位置で最も大きな値と

表-2 疲労照査結果(非合成桁モデル)

Tabel 1 Result of the fatigue test (non-composite beam model)

No.	評価対象継手及び部位		全照査位置における最大値			
			応力範囲の打ち切り限界に対する比率	累積疲労損傷比(2021年度末)	年当たり累積疲労損傷比(2019年度)	疲労余寿命(2021年度末)
①	主桁フランジ	垂直補剛材	0.78	-	-	-
②			1.01	0.266	1.13×10^{-2}	65
③	主桁ウェブ	垂直補剛材	0.75	-	-	-
④			0.98	-	-	-
⑤	主桁ウェブ	水平補剛材/横構ガセット	1.08	0.193	8.20×10^{-3}	98
⑥			1.40	0.402	1.71×10^{-2}	35
⑦	主桁ウェブ	荷重分配横桁フランジ	1.81	0.541	2.30×10^{-2}	20
⑧			1.95	0.670	2.85×10^{-2}	12

なる箇所の結果を示している。また、応力範囲の打ち切り限界に対する比率は、平均応力(応力比)の影響も考慮した一定振幅応力に対する応力範囲の打ち切り限界に対する最大応力振幅の比率を示している。この比率が1.0未満の継手については、発生応力範囲が打ち切り限界以下となることから、十分な疲労耐久性を有すると評価できる。比率が1.0を上回る継手に対しては線形累積被害則に基づき疲労余寿命を算出した。

この照査においては、2021年度末時点の累積疲労損傷比、2019年度の交通量を基に算出した年当たり累積疲労損傷比、2021年度末時点における疲労余寿命を示している。表から、一定振幅応力に対する打ち切り限界以上の応力範囲となる継手は6種類あり、継手⑧の主桁ウェブと荷重分配横桁フランジの継手部が最も疲労耐久性が低く、2021年度末時点における疲労余寿命が12年と厳しいことを確認した。

次に、実際の橋の挙動に近いと想定される床版との合成効果を考慮した合成桁として照査した結果を表-3に示す。床版との合成効果を考慮することで、発生応力範囲が小さくなり、一定振幅応力に対する打ち切り限界以上の応力範囲となる継手は2種類となった。また、継手⑧の2021年度末時点における疲労余寿命は31年となり、非合成桁の結果に対して約2.6倍となった。

図-5に継手⑧の全箇所の余寿命(合成桁)の分布を示す。この図から、余寿命が50年未満となるのはM2P-M3A間のG13桁の継手箇所のみとなっていることが確認できる。

以上から、解析により求めた応力範囲を基に疲労照査を行った結果、ウェブ貫通構造(H等級)を採用している箇所での疲労耐久性が比較的低いが、その位置は限定されることを確認した。

4. 応力頻度計測

実橋の実荷重下における疲労環境を評価するため、動ひずみ測定器を用いてひずみ計測を行った。計測は、2023年5月22日(月)14:07から25日(水)14:07の平日の連続72時間の計測を行った。ひずみ計測箇所を図-6に示す。計測は、解析において最も疲労耐久性が低いM2P-M3A径間のG13桁の支間中央(荷重分配横桁位置)のウェブ貫通構造を主な着目としてひずみゲージを配置した。また、主桁の床版との合成効果を確認するために同主桁の上下フランジにも配置するとともに、横桁による分配効果の確認のために横断方向に複数主桁の下フランジにも配置した。ひずみ計測は面内方向に1軸ゲージ(3線式)を貼り付け、サンプリング周波数100Hzでデータ収録した。

収録されたひずみ計測データを確認したところ、わずかな高周波数のノイズの混入と基線ずれが発生していたことから、これらの影響を除去することを目的にフィルタ処理を行った。なお、ハイパスフィルタとローパス

フィルタのカットオフ周波数はそれぞれ0.001Hz、20Hzとし、フィルタ処理前後でのひずみの波形形状を保持しながら基線ずれが補正できていることを別途確認したうえでフィルタ処理は適用した。

フィルタ処理を行ったひずみデータに鋼材のヤング係数($2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$)を乗じた値を変動応力とした。図-7にウェブ貫通構造部終点側(ゲージ14)の橋軸方向応力に

表-3 疲労照査結果(合成桁モデル)

Table 3 Result of the fatigue test (composite beam model)

No.	評価対象継手及び部位	全照査位置における最大値			
		応力範囲の打ち切り限界に対する比率	累積疲労損傷比(2021年度末)	年当たり累積疲労損傷比(2019年度)	疲労余寿命(2021年度末)
①	主桁フランジ 垂直補剛材	0.06	-	-	-
②		0.69	-	-	-
③	主桁ウェブ 垂直補剛材	0.06	-	-	-
④		0.68	-	-	-
⑤	主桁ウェブ 水平補剛材 /横構ガセット	0.09	-	-	-
⑥		1.13	0.221	9.40×10^{-3}	83
⑦	主桁ウェブ 荷重分配横桁 フランジ	0.06	-	-	-
⑧		1.68	0.428	1.82×10^{-2}	31

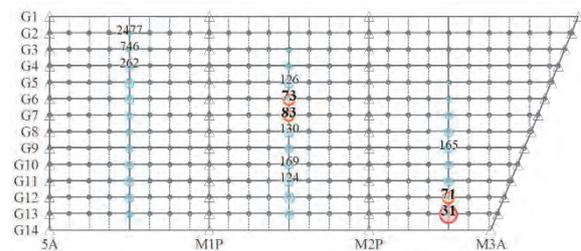
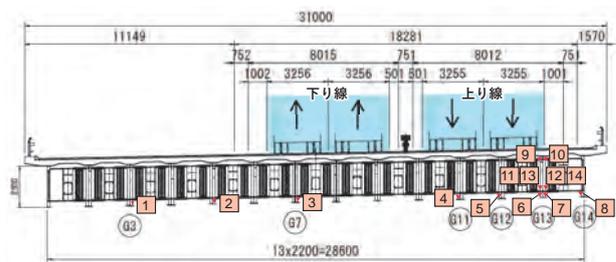
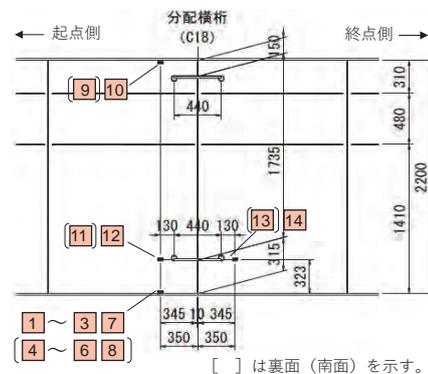


図-5 ウェブ貫通構造の疲労寿命分布図

Fig.5 Fatigue remaining life distribution of the web penetrated joint design



(a) 断面図 Cross section



(b) 側面図(主桁-分配横桁交差部) Side view of the cross section

図-6 ひずみゲージ配置図

Fig.6 Strain gauge layout plan

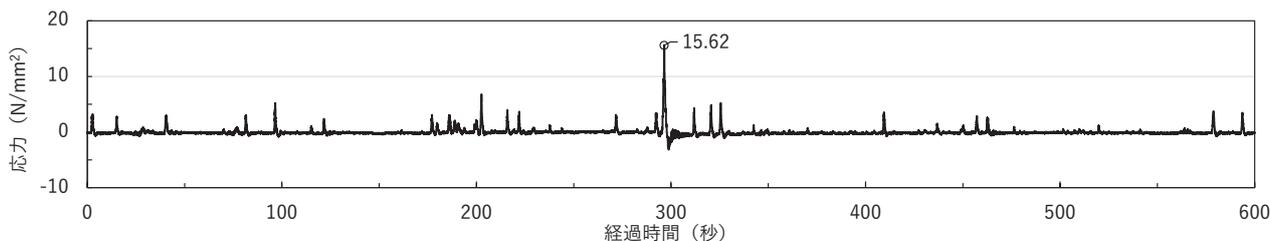


図-7 ウェブ貫通部(ゲージ 14_G13 終点側)の橋軸方向の変動応力 (2023/5/24 9:45 から 10 分間抽出)

Fig.7 Stress waveform of the longitudinal direction at gauge 14_G13; at the web penetrated joint point

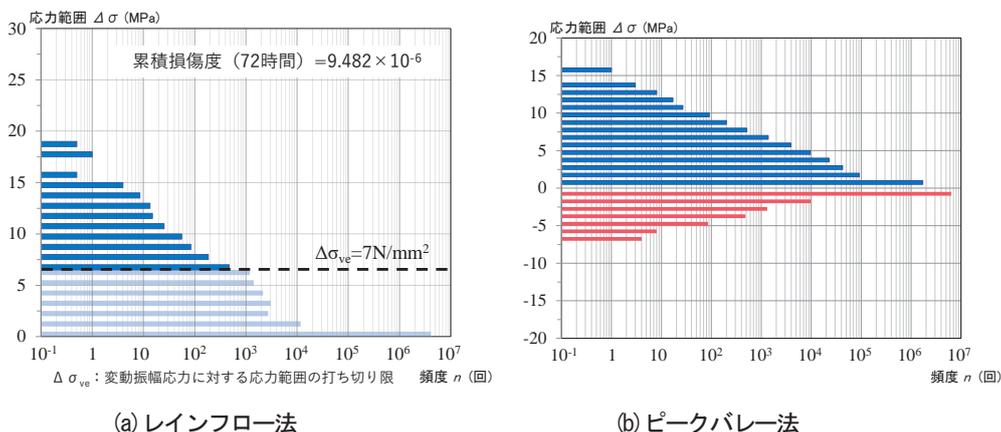


図-8 ウェブ貫通部(ゲージ 14_G13 終点側)の計測 3 日間(72 時間)の応力範囲の頻度分布

Fig.8 Frequency distribution of the stress range while monitoring for three days at the web penetrated joint point

ついて、大型車が通過する際のピーク応力発生時における応力波形を示す。これは、計測期間中最大値が得られた波形を含む10分間について抽出したものである。なお、当該貫通ガセット部については起点側、終点側のそれぞれ南北面の両面の計測を行った(ゲージ11~14の計4点)が、計測位置による計測値の差は大きくなかった。このため、比較的応答が大きかったゲージ14を代表として示している。なお、横桁下フランジとの接合部の主桁面内応力の72時間計測期間の最大値は約16N/mm²であった。また、抽出した10分間の最大値となった以外の大型車による応力はいずれも7N/mm²未満であり、疲労強度等級H等級の変動振幅応力の打ち切り限界未満であった。

次に72時間の変動応力を基にレインフロー法により応力頻度分析を行った結果を図-8(a)に示す。発生応力範囲の最大値は19N/mm²であることが確認できる。発生応力の符号の確認のため図-8(b)にピークバレー法による応力度分布の結果を示す。当該位置に発生する応力範囲は引張の繰返し作用が主であることがわかる。

得られた応力頻度分布を用いて、線形累積被害則(マイナー則)から計測3日間の疲労損傷度を算出し、疲労寿命を算出した。疲労寿命は、72時間の疲労損傷度を用いて累積損傷度が1.00となる年数として単純算出した。この結果、72時間の累積損傷度は9.48×10⁶となり、疲労寿命は867年と算出された。この結果から、当該橋梁のウェブ貫通構造は、実荷重下において発生する変動応力は小さく、疲労に対して十分な耐久性があると考えられる。

5. 荷重車載荷試験

解析による計算応力と実挙動との関係を把握することを目的に荷重車試験を行った。荷重車は図-9に示す散水車を積載した車両を用いることとし、あらかじめ軸重計を用いて軸重の計測を行った。軸重計測を行った結果を表-4に示す。

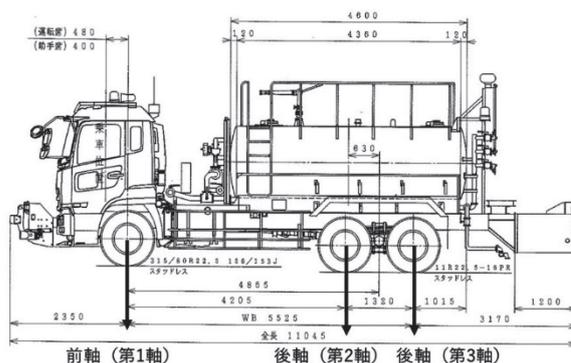


図-9 荷重車概要

Fig.9 Overview of the vehicle for loading

表-4 軸重計測結果

Table 4 Result of the vehicle axle load

項目	重量 (kg)	
車重 (全重量)	21,550	
各軸重	前軸 (第1軸)	6,850
	後軸 (第2軸)	7,400
	後軸 (第3軸)	7,300

荷重車は上下線の走行車線及び追越車線を走行することとし、走行速度は60km/h程度で走行位置は車線の中央位置とした。また、荷重車走行時には、当該橋の橋上が確認できる箇所からビデオ撮影によりその走行状況を撮影し、荷重車が当該橋梁に侵入した際の周辺の大型車の同時載荷状況を確認した。なお、計測結果を確認したところ、着目するM2P-M3A間のG13桁の応力は上り走行車線走行時に最も応力振幅が大きくなったため、これを整理対象とした。図-10にM2P-M3A間の支間中央のG13桁下フランジの応力について、解析値と計測値の応答波形を示している。なお、解析値は荷重車の軸重を解析モデル上で60km/hで移動させたとした際の経過時間に変換してグラフに表示している。また、ここでは荷重車の応答との直接の比較のため変動応力補正係数等の補正係数は考慮していない。この図から計測値と解析値で荷重車の走行による挙動は合うものの応答値については、計測値は合成桁として算出した応答値よりも小さく、最大で8.4N/mm²程度であることが確認できる。補正係数や解析条件の設定にもよるが、解析よりも実測の方が応答は小さいことを確認した。

6. 床版の合成効果

本橋は非合成桁として設計されているものの、実際には床版と主桁の間に設置されているずれ止め、上フランジとコンクリート床版の摩擦により、供用下では床版が主桁の一部として挙動するため合成桁に近い挙動をすることが想定される。図-11に荷重車載荷時(上り走行車線)のM2P-M3A間の支間中央のG13桁下フランジの応力が最大となる時のG13桁の上下フランジと横桁下フランジ位置の計測値と、解析値(非合成桁、合成桁)を示す。なお、解析値には変動応力補正係数等の補正係数は考慮していない。また、図中は、それぞれの値を線形回帰して求めた断面内の応力分布も直線で示している。計測値による応力分布の勾配は合成桁の勾配と概ね同程度であることが確認できる。したがって、本橋は非合成桁で設計されているものの、実橋は合成桁と同等の曲げ剛性を有しているといえる。一方で、計測値の応力分布は解析(合成桁)の分布から圧縮側に並行移動しているようにみえる。これは、格子解析では考慮していない横構から主桁に入ってくる軸力の影響であると考えられ、これも下フランジ位置の応力の計測値が解析値より小さくなった理由の一つと考えられる。

7. 横桁、対傾構の荷重分配効果

本橋は、設計上、横桁と対傾構の荷重分配効果を期待した設計が行われている。この効果について、実橋による計測と解析により確認した。図-12に荷重車載荷時

(上り走行車線)のM2P-M3A間の支間中央のG13桁下フランジの応力が最大となる時の横断方向の各主桁の応力について、G13桁の応力との比率としてプロットしたものを示す。この図より、計測値、解析値ともに荷重分配横桁により主桁の応力は広い範囲で分配されていることが確認できた。

横桁、対傾構の荷重分配効果の確認のため、格子解析モデルを用いて分配横桁、対傾構の考慮の有無による応答値の違いについて試算した。試算は基本ケースとして分配横桁・対傾構あり、試算ケースとして分配横桁のみ考慮したものと、分配横桁・対傾構ともなしのケースを試算した。荷重は上述の疲労照査の解析と同様にF荷重(変動応力補正係数考慮)を各車線中央に移動載荷した

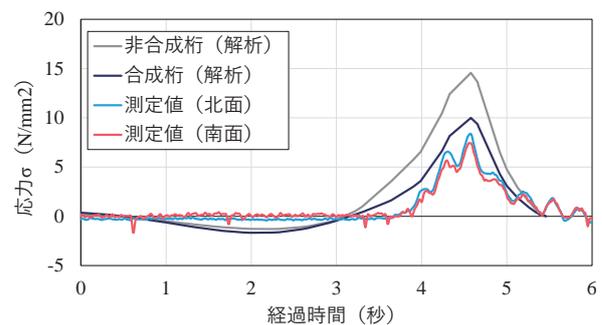


図-10 荷重車走行時の応答波形

Fig.10 Response wave form when loading vehicle run

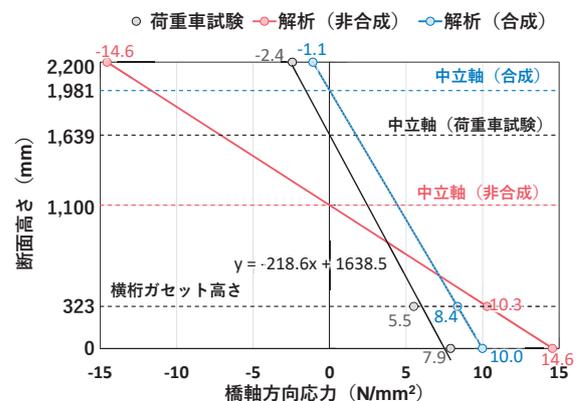


図-11 断面内応力分布

Fig.11 Cross section stress distribution

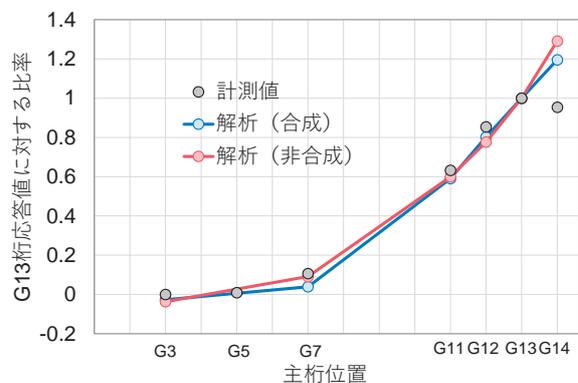


図-12 横分配効果

Fig.12 Load distribution effect from the side

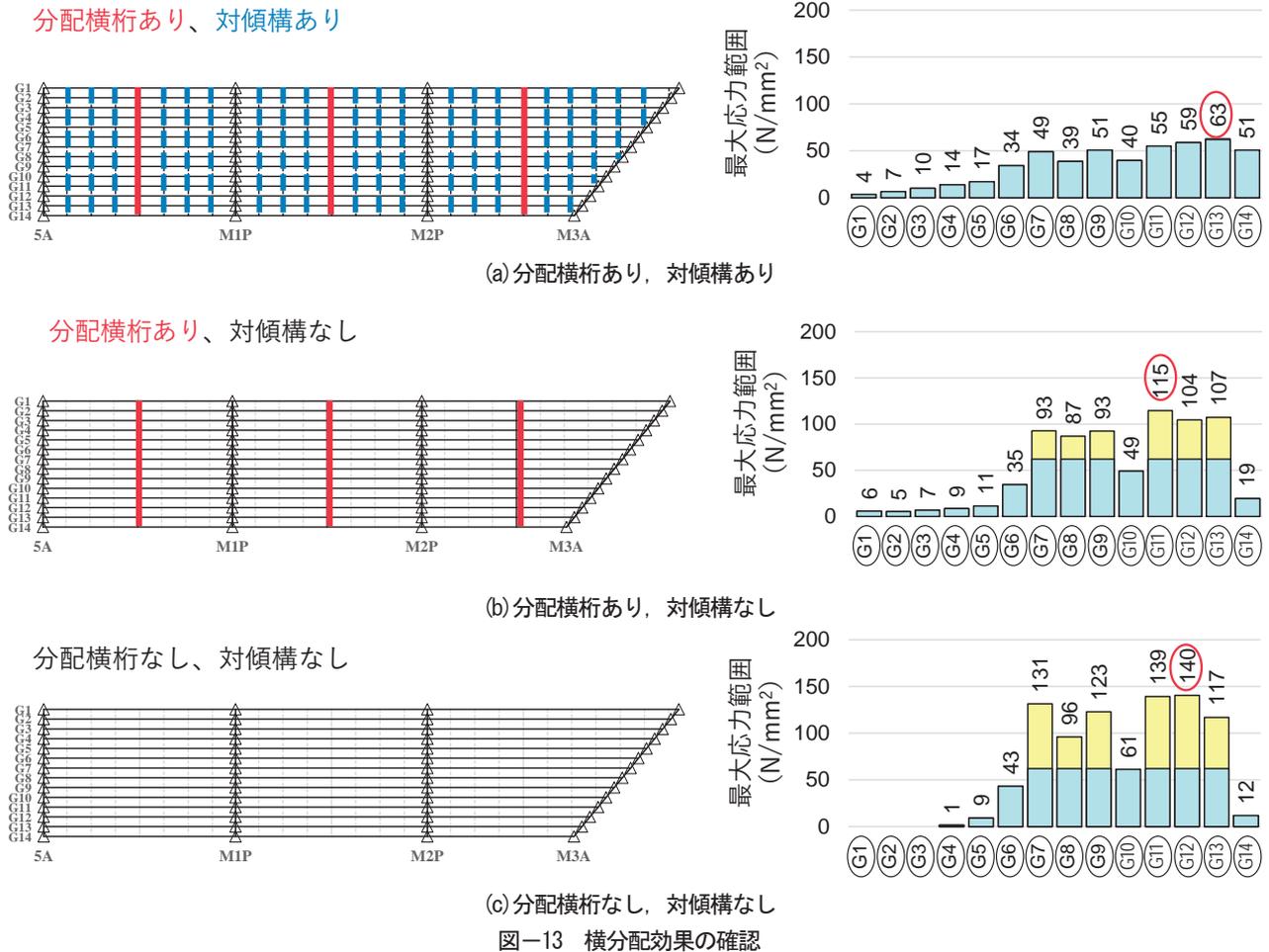


Fig.13 Comparison of Load distribution effect from the side

際の、M2P-M3A間の各主桁の下フランジの応力範囲の最大値を抽出した。なお、解析モデルは非合成桁である。試算結果を図-13に示す。分配横桁・対傾構ありのケースに比べて分配効果を考慮しないケースでは荷重載荷近傍の主桁のみで荷重を負担することから主桁の発生応力範囲が大きくなっていることが確認できる。分配横桁と対傾構ともに考慮しないケースでは、考慮した場合に比べて最大応力範囲が2.2倍となった。また、対傾構のみ未考慮の場合でも最大応力範囲が1.8倍となり、対傾構の荷重分配効果は大きいことが確認できた。本橋ではこれらの部材により主桁の応力が横方向に広く分配されることで、荷重載荷点近傍の主桁の応力負担が低減されており、これが疲労耐久性の向上に寄与していると考えられる。このため、分配横桁、対傾構も主部材と位置付けて維持管理していくことが望ましいと考える。

8. おわりに

疲労耐久性の低いウェブ貫通構造を有する孫崎高架橋を対象に格子解析及び現地計測により疲労照査を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) H29道示に基づく疲労照査の結果、M2P-M3A間の支間中央のG13桁のウェブ貫通構造が最も疲労環境が厳しいと評価された。
- 2) 孫崎高架橋における現地計測の結果、実働荷重下では主桁の応力は小さく、疲労に対しては十分な耐久性を有することがわかった。
- 3) 主桁応力が小さい理由としては以下が考えられる
 - ・本橋は非合成桁で設計されているものの、実橋は合成桁と同等の曲げ剛性を有している。
 - ・主桁が低く、主桁間隔が狭いため、中間横桁、対傾構による横分配効果が大きい。
- 4) 荷重分配横桁、対傾構が荷重分配効果に寄与していることが疲労耐久性に有利に働いていることから、荷重分配横桁、対傾構も主部材と位置付けて維持管理していくことが望ましい。

謝辞

本論文中の現地計測は2023年度の疲労対策チームのメンバーの直営にて行った。また、現地計測に必要な調整や荷重車の手配等、鳴門管理センターにご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2012.3
- 2) 川端淳：岩黒島橋の鋼床版垂直補剛材のひずみ計測と疲労評価，本四技報Vol.37, No.120, pp.3-10, 2013.3
- 3) 貴志友基：門崎高架橋における鋼床版疲労亀裂の発見と応急対策，第23回本四高速技術発表会，pp.29-35, 2013.7
- 4) 小林義弘：疲労対策への取組(疲労対策チーム活動)，本四技報Vol.38, No.121, pp.33-134, 2013.9
- 5) 柿市拓巳，石川敏之，小塩達也，山田健太郎：鋼板桁橋の横桁フランジ取り付け構造の応力実測と疲労耐久性評価，構造工学論文集，Vol.57A, pp.852-859, 2011.3
- 6) (公社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編，2017.11
- 7) 佐々木翔大，北川竜三，杉本祐一：孫崎高架橋(多数主桁I桁橋)の長期防食対策，本四技報Vol.43, No.131, pp.20-26, 2018.9
- 8) (公社)日本道路協会：鋼道路橋疲労設計便覧，2020.9

BIMと連携したタブレット端末による 長大橋点検支援システムの開発

Development of a long span bridge inspection support system using tablet linked to BIM

河野 晴彦

Haruhiko Kono

長大橋技術部

技術革新・アセットマネジメント課

担当課長

山口 和範

Kazunori Yamaguchi

長大橋技術部 次長

杉山 剛史

Takeshi Sugiyama

JBツールシステム(株) 常務取締役

(前)長大橋・技術部

技術革新・アセットマネジメント課長

概要

本州四国連絡高速道路株式会社が管理する長大橋は、構造が複雑で部材数が多いため、点検業務において過去変状記録の現地確認、及び点検記録の作成に多くの時間を要していることから、長大橋点検業務の高度化、効率化を目的として、3次元モデルを活用した点検支援システムBIX-eyeを開発した。

本稿では、タブレット端末でカメラ越しに捉えた画像(物理空間)と長大橋の3次元モデル(仮想空間)とを常時自動重畳させることにより、点検現場で過去変状記録の確認、及び新規変状の記録を効率化するBIX-eyeの開発と現場実証試験結果について報告する。

The long span bridges managed by Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited have complex structures and a large number of members, which require much time for on-site identification of past deterioration records and the preparation of inspection records. Therefore, we have developed BIX-eye, an inspection support system using 3D models, in order to improve the sophistication and efficiency of long span bridge inspection work.

This paper reports on the development and on-site test results of BIX-eye, a system that automatically superimposes images captured by a camera on a tablet (physical space) with a 3D model of a long span bridge to efficiently confirm past deterioration records and record new deterioration at the inspection site.

1. はじめに

本州四国連絡高速道路株式会社(以下「本四高速」という。)は、高速道路事業の高度化、効率化を推進している¹⁾。高速道路事業のうち保全業務では、大規模で複雑かつ多くの部材を有する17橋の長大橋の維持管理を行っており、将来、経年劣化による変状の増加や人口減少による担い手不足等が予想されることから、BIM(Building Information Modeling)モデルをプラットフォームとした維持管理におけるPDCAの高度化、効率化に取り組んでいる²⁾。維持管理の中でも特に点検業務では、点検前の事前準備、点検時の過去に記録した変状の状態確認、及び新規変状登録、点検後の報告書作成に多くの時間を要している。

近年、建設業においてDX(Digital Transformation)が進められており、AI、IoT、BIM等のデジタル技術の活用に関する研究、開発が行われている。点検作業の高度化、

効率化の既往の取組として、橋梁3Dモデルを活用したデジタル点検野帳の開発³⁾が進められているが、複雑かつ多くの部材を有する長大橋の点検を実施するにあたっては、現地で対象部材を検索する必要があるため、大幅な業務の効率化は難しい。

本四高速が管理する長大橋は、いずれも供用後25年以上が経過しているが、構造図面の電子化されたものがなく、図面の数量が膨大であるため、CAD図面が十分に整備されていない。そこで、本四高速が管理する吊橋の中でも主桁の構造が比較的単純な大島大橋(図-1)を対象にBIMモデルを構築した。そして、MR(Mixed Reality)技術によりタブレット端末のカメラ画像と構築したBIMモデルとを常に重畳させ、タブレット端末に表示される橋梁部材に直接情報の入力を可能とする長大橋の点検支援システムBIX(Bridge inspection support system by XR/DX)-eye(Inspectors' eye)を開発した。本稿では、BIX-eyeの開発内容と現場実証試験による適用性の確認結果、及び現場実証試験により得られた課題について述べる。

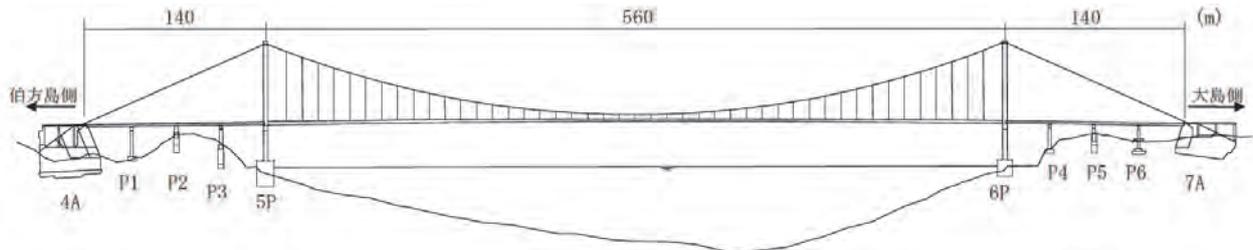


図-1 大島大橋一般図

Fig.1 General view of Oshima bridge

2. 大島大橋BIMモデルの構築

2.1 BIMモデルの構築

維持管理で使用するBIMモデルは、設計、製作、建設工事での活用を目的としたモデルの精度までには必要ないため、国土交通省が示すBIM/CIMガイドライン(案)⁴⁾における詳細度200程度(主構造の形式や付属物の形状がわかる程度)でのモデル化を基本とし、維持管理上詳細度の向上が必要な部材については、詳細度を上げてモデル化した。

長大橋のBIMモデルを新たに構築するためには多くの工数、費用がかかることから、耐震検討のために作成したファイバー要素を用いた3次元解析モデル(以下「ファイバー要素解析モデル」という。)を活用してBIMモデルを作成し、維持管理に必要な構造分類などの属性情報を付与した。

ファイバー要素解析モデルは、図-2に示すとおり、断面変化位置等の主要点に接点を設け、断面情報の形状入力が可能なファイバー要素、断面定数(断面積A, 断面2次モーメントI, ねじりモーメントJ)を付与した梁要素等で接続している。ファイバー要素は、中央径間の補剛桁、主塔、及び側径間の下部構造に用いている。このファイバー要素解析モデルを3DCADデータにデータ変換し、データ変換の過程で立体的な面の情報を保持できない部材や維持管理においてモデル化が必要な部材(側径間上部構造・下部構造、ケーブル類、アンカレイジ、基礎、橋梁付属物等)については、手作業により追加作

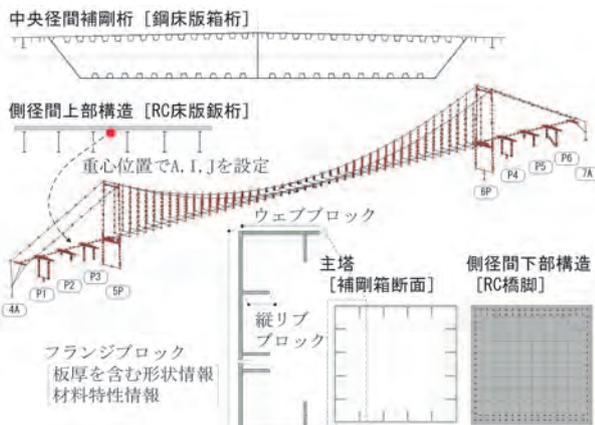


図-2 ファイバー要素解析モデルの概要

Fig.2 Overview of fiber element analysis model

図を行った。なお、3DCADデータへのデータ変換にあたっては、データ容量の低減、及び維持管理情報の記録に配慮し、3Dソリッド要素の使用は限定的として、面要素で作図した。構築したBIMモデルを図-3に示す。

鋼橋の設計、製作、建設工事での活用を目的として作成されるBIMモデルの構造オブジェクトは、製作単位となる添接部間でオブジェクトが区分される。維持管理ではダイヤフラム間等で維持管理区分を分けて管理していることから、BIMモデルの維持管理での活用方法を踏まえてSketchUpを用いてBIMモデルを編集し、オブジェクトを維持管理区分に分割した(図-4)。

2.2 BIMモデルの構造化定義

構造化定義とは、BIMモデルの全ての部材を識別可能とするためのルールである。BIMモデルを維持管理に活用するにあたって、任意の部材と変状履歴を紐づけることで点検業務の効率化につなげるため、全てのオブジェクトに属性を付与した。付与した属性は、本四高速が長大橋の点検・補修情報を管理しているシステム(IRIS: Inspection and Repair data Information System)で定義されている



図-3 BIMモデル

Fig.3 BIM model

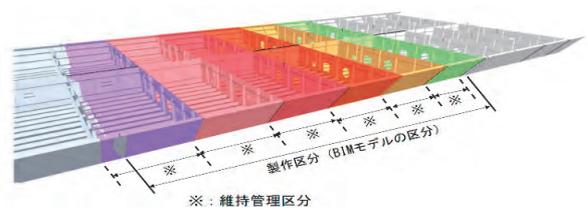


図-4 BIMモデルにおける維持管理区分と製作区分の相違

Fig.4 Difference between sections for maintenance and fabrication in BIM models

表-1 長大橋構造分類(抜粋)

Table 1 Classification of structures of long-span bridge (excerpt)

大分類	分類Ⅰ	分類Ⅱ	分類Ⅲ	分類Ⅳ
40000 ケーブル	41000 吊橋ケーブル	41100 主ケーブル一般部	41110 主ケーブル素線 41120 主ケーブル被覆材	41121 ケーブル塗膜 41122 ラッピングゴム 41123 ラッピングワイヤー 41124 ステンレスカバー
		41200 ケーブルアンカー部	41210 アンカーフレーム 41220 引張材	
		41300 サドル部	41230 主ケーブル定着部 41310 ケーブルサドル本体 41320 ハンド定着金物	

5階層の構造分類と分類コードに加えて、維持管理区分の番号や橋軸に対して対称となる部材の方位等の識別情報を付与し、個々の部材、部位を識別できるようにした構造分類の例を表-1に示す。

属性の付与にあたっては、BIMモデルの将来的な拡張性を考慮し、IFC(Industry Foundation Classes)に準拠したデータ形式とするため、SketchUpで編集したBIMモデルをAutodesk社のdwg形式で保存した上でCivi3Dで開き、Excelで一覧表に整理した属性情報をCivi3DプラグインのArkCiviから読み込ませることによって一括付与した。タブレット端末用アプリケーションでは、属性情報を継承でき、かつ、データ容量が小さく描画の高速処理に対応可能なGLB形式に変換した3Dモデル(以下「3Dモデル」という。)が必要となる。そこで、予めBIMモデルの編集に使用するソフトウェアにおける互換性、及びGLBへ変換した際の属性継承の互換性を確認した上で、Civi3DからIFC4で出力したものをIfcConverterによりGLB形式に変換した。

維持管理でBIMモデルを活用するにあたっては、部材の内外面や各側面を判別できるようにする必要があるが、モデルを分割して定義するとモデルの数が多くなり、データ容量も大きくなることから、部材の各側面の判別については、以降のタブレット端末用アプリケーションで判別可能なシステムを検討した。

3. 点検支援システムBIX-eyeの開発

長大橋の点検を支援するツールとして、市販のタブレット端末等を使用し、前章で構築した3DモデルとMR技術を適用した点検支援システムBIX-eyeを開発した。

3.1 使用ハードウェア

タブレット端末はLiDAR機能を有するiPad Pro 11インチ(第4世代)を使用し、防塵・防滴ケース及び落下防止ストラップを設置した。位置座標の取得には、RTK(Real Time Kinematic)測位方式により高精度で安定した相対測位が可能なレフィクシア社製LRTK Phone(以下「LRTK」という。)を使用した。タブレット端末とLRTKは、Bluetoothにより通信を行うが、タブレット端末のカメラ画像とBIMモデルを精度よく重畳させるためにはLRTKとタブレット端末のカメラとの位置関係を固定する必要があることから、専用の固定治具によりLRTKとタブ



写真-1 タブレット端末へのLRTK Phone 設置状況

Photo 1 LRTK Phone mounted on tablet

レット端末を一体化した(写真-1)。

3.2 データの読込、保存

点検時に点検箇所や移動の途中でオフライン環境となることも想定し、点検作業開始時に外部のクラウドサーバから3Dモデルデータや点検範囲における過去の変状記録等をタブレット端末に読込むものとした。点検時の記録は、オフライン環境下で作業でき、かつ、BIX-eyeが異常停止した場合においても記録内容が失われないよう、タブレット端末のローカルDBにデータ保存する。クラウドサーバへの記録データのアップロードは、タブレット端末における実行機能により、オンライン環境下でアップロードを実施する。

3.3 タブレット端末画像とBIMモデルの重畳

長大橋の点検支援システムを開発するにあたって、タブレット端末の現実画像とBIMモデルの重畳表示には、現実世界と仮想世界とを融合し、リアルタイムで相互作用させることが重要である。そこで、BIX-eyeに実装するMRシステムとして、インフォマティクス社製のGyroEyeを活用した。BIX-eyeは、3Dモデルをクラウドサーバからタブレット端末に読み込み、タブレット端末の座標値と3Dモデルの座標値を紐付け、タブレット端末画面に表示されるカメラ画像(以下、端末画像)と3Dモデルを3次元で重畳する。BIX-eyeにおける3Dモデルの表示は、端末画像と3Dモデルとの重畳性確認や、重畳に多少ずれが生じていた場合でも3Dモデルから直接データを入出力できるよう、タブレット端末に表示される3Dモデルの透過度を自由に換えられるものとした。当機能を活用し、3Dモデルを完全に透過させることに

よって、タブレット端末に映る画像から部材を直接選択できる操作表現を可能とした。

3.4 位置情報の取得

点検開始時に端末画像と3Dモデルを高精度で重畳させるため、衛星電波の受信が可能な環境(以下「オープンスカイ環境」という。)及び衛星電波の受信が不可能な環境(以下「衛星電波不感地帯」という。)におけるタブレット端末の自己位置情報の取得方法を検討した。

(1) オープンスカイ環境での位置情報の取得

予めLRTKにより既知点2点の座標(緯度、経度、標高)を測定し、標高はLRTKのアンテナ位置と機器下端のオフセットを考慮して標高値を算出した上で、座標情報を3Dモデルに登録した。点検開始時、図-5に示すとおり、オープンスカイ環境となる任意の2地点でLRTKにより位置座標を取得することにより、タブレット端末の自己位置と方角を自動定義し、端末画像と3Dモデルを高精度で重畳する。

既知点2点の設定にあたっては、アンカレイジ4A、7Aそれぞれにおける3Dモデルの部材頂点とし、かつ、現地測定可能な箇所を2箇所ずつ選定した上で、LRTKによる測定を2回ずつ行った。測定結果から、それぞれのアンカレイジにおいて測定誤差が小さい箇所を既知点として設定した。

表-2に示す既知点2点の測定結果より、設定する座標値として、X、Y座標は1回目と2回目の平均値とし、標高については1回目と2回目の測定結果の平均値からLRTKのアンテナ先端から下端までの長さ(0.201m)をオフセットとして減じた値を設定した。

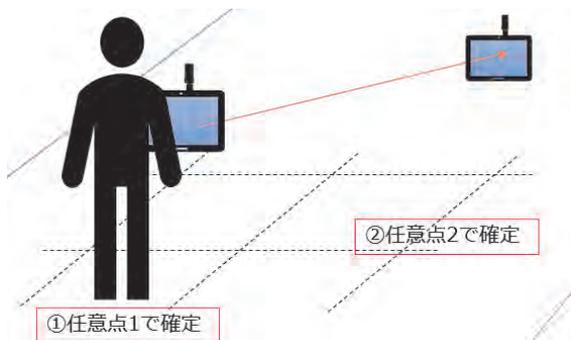


図-5 自己位置情報の取得イメージ
Fig.5 Image of obtaining self-location information

表-2 既知点の座標値の測定誤差

Table 2 Measurement error of the coordinate of a known point

		X座標(m)	Y座標(m)	標高(m)
4A	1回目	132634.285	-39146.418	35.622
	2回目	132634.295	-39146.422	35.574
	誤差	10mm	4mm	48mm
7A	1回目	131977.547	-39655.308	35.555
	2回目	131977.516	-39655.302	35.583
	誤差	31mm	6mm	28mm

(2) 衛星電波不感地帯での位置情報の取得

衛星電波を受信できない部材内部等への移動により位置座標が大きくずれた場合や、衛星電波を受信できない部材内部から点検開始する場合を想定し、予めシステム側でカメラ位置と注視点位置を設定した。そして、現場において端末保持位置と端末の方向を一致させることにより位置情報を呼び出す地点(ビューポイント)を設定し、ビューポイントでタブレット端末の保持位置と端末の向きを合わせることで自己位置情報を容易に取得し、端末画像と3Dモデルとを重畳できるようにした。

3.5 自己位置補正

位置座標の取得後、移動に伴う自己位置補正は自己位置の誤差をできる限り少なくするため、自己位置推定と環境地図を同時に作成するSLAM (Simultaneous Localization and Mapping)技術により、1m移動する度に仮定の動的アンカーを設定しながら自己位置を補正し、端末画像と3Dモデルとをリアルタイムで重畳するものとした。ただし、SLAMによる自己位置補正は、端末のカメラに映る画像とLiDARセンサーにより自己位置を推定し位置情報の補正を行うことから、移動時における照度確保や端末のカメラ及びセンサー部分を手で覆わないことなど、留意が必要である。位置情報取得後やSLAMによる自己位置補正後の自己位置の多少のずれに対しては、平面直角位置、高さ位置及び方角の手動補正機能を設けた。

3.6 点検の記録、閲覧、更新

BIX-eyeでは、変状の位置図を除き、現行の点検業務における点検報告書及び変状報告書の記録内容に合わせて同様のデータ登録が可能となるようデータ入力画面を構成した。点検日や点検者等の点検報告書と変状報告書の共有事項については、点検開始時に点検登録として点検報告書に該当する入力データを変状記録時に自動反映するものとした。これ以外のデータ入力については、変状報告書の自由記述欄を除き、プルダウンで選択入力できるものとした。変状の記録にあたり、対象部材の属性情報の抽出、反映方法について2つの機能を開発した。1つ目は、端末画像の部材を直接選択して変状を記録することで対象となる部材の属性情報を重畳する3Dモデルから抽出するものである。2つ目は、端末画面上で部材を選択せず写真を撮影する場合において、端末からの法線とオブジェクトの衝突近辺の属性を登録先属性候補として自動抽出するものである。それぞれの属性情報抽出にあたって、自己位置座標の情報から部材の内外面等を自動判定、記録できるものとした。これらの属性情報抽出機能により、構造分類などの属性情報の入力の間違いが無くなるため、情報が正確に継承されることとなる。

過去の変状記録については、AR(Augmented Reality)技術により端末画面に変状位置に球体オブジェクトとして表示し、オブジェクトを選択することによって、詳細な記録の確認、及び記録の更新ができる。

4. 現場実証試験

4.1 試験方法

タブレット端末にBIX-eyeを実装し、現地における実証試験を行った。実証試験では、**図-6**に示すとおり路面上(未共用部)においてLRTKにより位置情報を取得後、路面から主塔内部を通り、主塔水平材上部を經由して主桁内部まで移動し、端末画像と3Dモデルとの重畳の追従性、及びタブレット端末と3次元モデルとの連携やデータ入出力機能の使用性について検証を行った。路面上での実証試験状況を**写真-2**に示す。

4.2 位置情報の取得精度

路面上でLRTKにより2点基準点を取得し、自己位置と方角の自動定義に要した時間は数分程度であり、短時間で自己位置と方角の取得が可能であることを確認した。

2点基準点取得後の端末画像と3Dモデルとの重畳の結果は**図-7, 8**に示すとおり、横方向に0.3m程度のずれと方角のずれを確認した。これは、2点基準点を取得する際、それぞれの基準点においてLRTKで取得した緯度経度の誤差が影響していると考えられるが、点検作業に使用するにあたり、ほとんど影響がない程度の誤差であると言える。

移動による位置情報の追従性は、路面上では精度よく追従することを確認したが、路面上から主塔内部に入り、

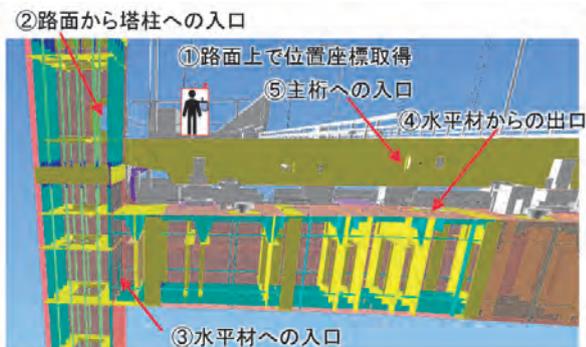


図-6 実証試験における移動経路
Fig.6 Travel route in the on-site test



写真-2 実証実験状況(路面上)
Photo 2 on-site test (on road surface)

主塔水平材内部から主塔水平材上面に出た後、主桁内部に入ったところで1~2m程度の横ずれを確認した(**図-9**)。これは、移動時にタブレット端末の保持方法に留意していても主塔内部の管理用階段や各部材間のマンホール部等、SLAMの課題として考えられる環境が暗く狭い箇所を通過することにより誤差が生じたものと考えられる。

4.3 位置情報の補正

移動に伴う自己位置のずれに対して、タブレット端末の画面を手動で操作して位置補正を行うことによって容易に補正が可能であることを確認した(**図-10**)。しかし、衛星電波不感地帯である主桁内部まで移動すると自己位

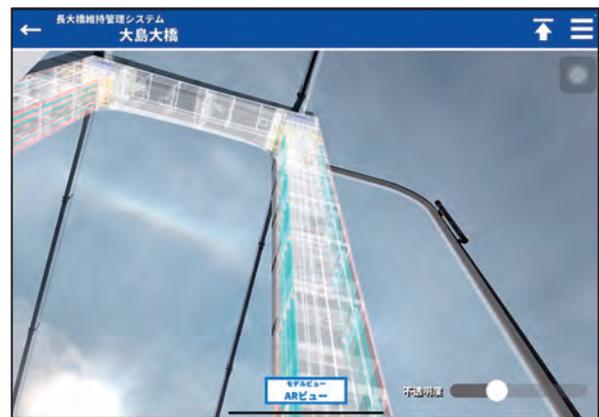


図-7 重畳結果(主塔)

Fig.7 Superimposition (main tower)



図-8 重畳結果(主桁及びケーブル類)

Fig.8 Superimposition (main girder and cables)



図-9 主桁入口における重畳のずれ

Fig.9 Error of superimposition at the main girder entrance

置のずれが大きく、手動補正に時間を要した。そこで、主桁入口部において予め設定したビューポイントにより位置情報を補正することによって、図-11のとおり自己位置情報を容易に補正できることを確認した。

4.4 点検記録機能の確認

端末画像と3Dモデルの連携により、端末画面で任意の部材を選択することで部材の属性情報を抽出、記録できることを確認した。

また、端末画面上で部材を選択せず、変状を記録したい部材に対してタブレット端末で写真を撮影した結果、3Dモデルと連携して対象部材の属性情報を自動で抽出、記録できることを確認した。



図-10 手動位置合わせ
Fig.10 Manual positioning



図-11 ビューポイントによる位置補正(主桁内部)
Fig.11 Position correction by viewpoints (inside main girder)



図-12 過去変状の確認状況
Fig.12 Identification of previously recorded deterioration

4.5 タブレット端末画面と変状記録の連携確認

クラウドサーバーに保存している3Dモデルに予め登録しておいた変状記録をタブレット端末画面に重畳させ、タブレット端末上で過去の変状記録の選択、閲覧、編集ができることを確認した(図-12)。

5. おわりに

大島大橋を対象として、耐震検討のために作成したファイバー要素解析モデルを基に維持管理に必要な属性情報を付与したBIMモデルを構築し、構築したBIMモデルとMR技術を活用した長大橋点検支援ツールBIX-eyeを開発した。なお、当開発技術は特許出願中である。

BIX-eyeにより、端末画面を操作して対象部材の変状箇所を選択し、変状写真の登録や変状記録の作成、過去の変状記録の確認が可能であることを確認した。また、自己位置推定技術により、衛星電波不感地帯に移動してもタブレット端末のカメラ画像と3Dモデルの重畳が追従し、誤差が生じるものの手動補正やビューポイントによる補正によって自己位置を補正できることを確認した。しかし、衛星電波不感地帯における自己位置の補正には時間を要し、業務効率の低下につながるため、自己位置補正の効率化が課題である。

今後、長大橋点検業務への導入に向けて自己位置補正の更なる高度化、効率化を図るとともに、ユーザーインターフェース等のシステム開発を進める。

参考文献

- 1) 森山彰：高速道路事業高度化本部の取組，本四技報，Vol.48，No.140，2023.6
- 2) 藤田憲二：保全業務高度化部会の取組，本四技報，Vol.49，No.142，2024.9
- 3) 田井政行，白旗弘実，河合孝純：橋梁定期点検用デジタルツイン点検野帳の開発，インフラメンテナンス実践研究論文集，Vol.2，No.1，2023.3
- 4) 国土交通省：BIM/CIM活用ガイドライン(案)，令和4年3月

長大橋点検を支援する腐食検出AIの構築

Development of Corrosion Detection AI to Support Long-Span Bridge Inspections

田村 拓登

Hiroto Tamura

長大橋技術部

技術革新・アセットマネジメント課

河野 晴彦

Haruhiko Kono

長大橋技術部

技術革新・アセットマネジメント課
担当課長

杉山 剛史

Takeshi Sugiyama

JBツールシステム株式会社

常務取締役

(前)長大橋・技術部

技術革新・アセットマネジメント課長

概要

本州四国連絡高速道路(以下「本四高速」という)の長大橋における変状の多くは腐食である。適切な補修を行うため、点検により腐食箇所を特定し、その数量や位置を記録した上で、点検・補修情報管理システムInspection & Repair Information System(以下「IRIS」という)に登録している。しかし、長大橋は構造が複雑であり、部材数が膨大なため作業負担が大きく、将来、少子高齢化による労働力不足も懸念されることから、効率化が求められる。

本研究では、点検作業の効率化を目的に、画像から腐食を検出するAIを構築し、IRISに登録された変状画像や大島大橋で取得した画像を用いて検出精度を検証した。また、AIにより検出された腐食の面積の算出及び腐食位置情報の取得手法についても検討を行った。

The most common anomalies in the long-span bridges managed by Honshu-Shikoku Expressway Company Limited (HSBE) result from corrosion. To ensure effective repairs, corrosion is identified on-site through inspections, recorded in terms of quantity and location, and registered in the bridge management system, the Inspection & Repair Information System (IRIS). However, due to the complexity and large number of components in long-span bridges, inspections are labor-intensive, and the future labor shortages also necessitate improved efficiency.

This study aims to streamline the inspection process by developing AI to detect corrosion from images. The detection accuracy was evaluated using images from IRIS and a case study conducted at Ōshima Bridge. Furthermore, methods for estimating corroded areas and obtaining location data were explored.

1. はじめに

本四高速では多くの長大橋を管理しており、橋梁ごとに異なる特徴を有していることに加え、それぞれが多くの部材を有していることから、点検・補修作業に多くの労力を要している。そのため、現在、点検から補修に至るPDCAの高度化・効率化を目指し、BIM/CIM(Building Information Modeling /Construction Information Modeling)をプラットフォームとした、図-1に示す次世代維持管理システムの構築に取り組んでいる。

本稿では、次世代維持管理システムのCheck(点検・モニタリングの高度化)にあたる、点検作業の効率化を目的とし、撮影画像からさびや腐食を検出可能なAIを構築した。それに加え、点検結果の整理作業を効率化することを目的に、検出した腐食の面積や数量、位置情報を自動で取得し、BIM/CIMと連携させる手法について検証を行った。

また、構築したAIや検討した手法について、大島大橋を対象に現地実証を行った。大島大橋は本四高速の中でも比較的規模が小さく、箱桁というシンプルな構造を有することから、現地実証のフィールドとして選定した。



図-1 次世代維持管理システムイメージ
Fig.1 Next-Generation Maintenance and Management System Concept

2. AIの構築及び精度評価

AIの構築には大量の教師データが必要であり、本四高速ではこれまでの点検結果をIRISに蓄積している。

そこで、IRISに登録されている過去9年度分の明石海峡大橋の腐食画像を教師データとして使用し、AIを構築した。その後、大島大橋で取得した腐食画像を教師データとして補完し、検出精度の検証を行った。

以下に、AIの構築及び検証内容の詳細を示す。

2.1 AIの構築フロー

AIの構築フローを図-2に示す。

(1) データ収集・加工

IRISに登録された腐食箇所の画像を教師データとして抽出し、画像編集ソフト(The GIMP Development Team)を用いて腐食部を塗りつぶすことで、腐食部とそれ以外に二値化し、教師データを作成した。なお、本作業は手作業により実施した。

(2) 学習フェーズ

教師データ腐食部の特徴を学習させることで、AIを構築した。AIの構築には、Detectron2(Meta社)を採用し、機械学習を行った。

(3) 検出フェーズ

学習したAIが腐食を検出できるか確認するため、教師データとして使用した画像を基に、AIに腐食の検出を実行させ、検出データを生成した。

(4) 精度評価

教師データと検出データを比較してAIの精度評価を実施した。

(5) データ拡張

精度評価の結果、精度が低い場合は後述のデータ拡張により教師データを増強したうえで再度学習を行うことで検出精度の向上を図り、改めて精度評価を実施した。

(6) 実証

未学習の画像を使用し、上記で得られたプログラムを実行した。

2.2 IRIS登録データを用いたAI構築

(1) AIの構築

前項で示したフローに基づき、IRISに登録されている明石海峡大橋の変状報告書(2014年～2022年登録分)に添付された写真について、写真上に変状位置を示す矢印や赤枠等のオートシェイプが含まれない画像を選定し、トリミングすることでAIの学習に用いる画像を計3,695枚抽出し、教師データを作成した。抽出した写真における腐食の発生箇所の内訳を表-1に示す。また、作成した教師データ1枚当たりの学習回数については4,000回(約1時間)とした。これは本研究の初期段階にて試行的に設定した値であり、後述にてその値が適切かどうか、検証を行った。

(2) 検出結果

構築したAIを用いて、教師データとして使用した明石海峡大橋の腐食画像を対象に検出を実施した結果を、図-3に示す。撮影距離が近距離であり、範囲が広い腐食が含まれる画像では検出精度が高かった一方、遠距離の画像やハンガーロープ、高力ボルトに生じた微小な腐食を含む画像、補修済みの箇所が写りこんだ画像では検出精度が低下する傾向が見受けられた。検出精度の低下要因として、遠距離画像及び微小なさび・腐食は、検出対象が画像全体に占める割合が小さいことから、AIが学習できる情報が限られること、遠距離画像は検出対象である腐食部以外の情報が多く含まれていること、にハンガーロープに関する教師データの数量が不足していること、補修済み箇所が腐食と似た色調で写りこんだ場合は腐食として誤検出されやすくなることが考えられる。

また、検出結果を混同行列として整理し、検出精度の定量的な評価を行った。混同行列では、AIの予測結果と正解の対応関係を、AIの予測(腐食有)と正解(腐食有)が一致している True Positive (TP)、AIの予測(腐食有)と正解(腐食無)が一致していない False Positive (FP)、AIの予測(腐食無)と正解(腐食有)が一致していない False Negative (FN)、AIの予測(腐食無)と正解(腐食無)が一致している True Negative (TN)の4つに分類分けを行った(表-2)。

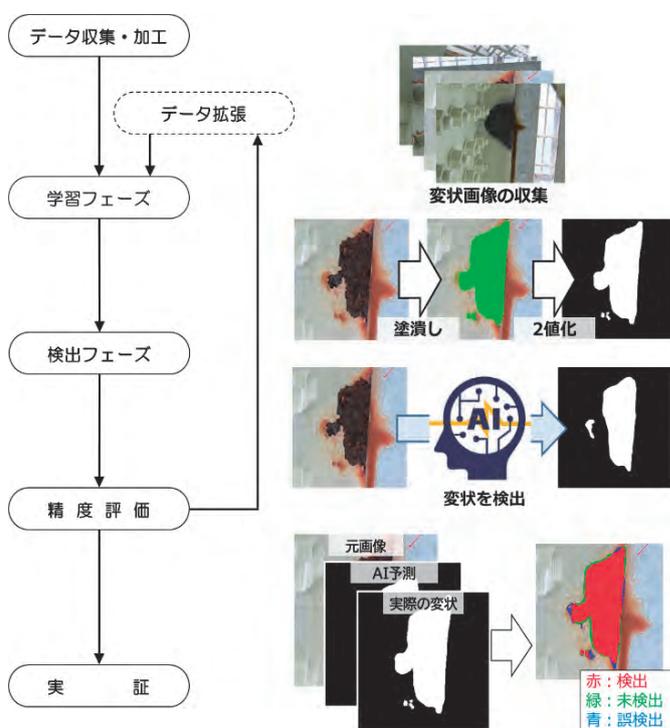


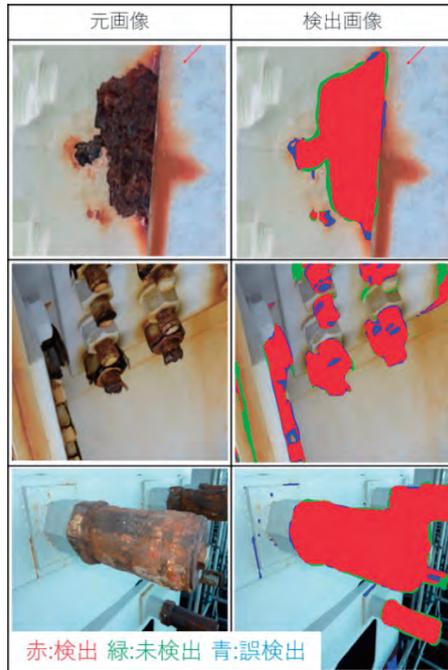
図-2 AIの構築フロー

Fig.2 AI Development Workflow

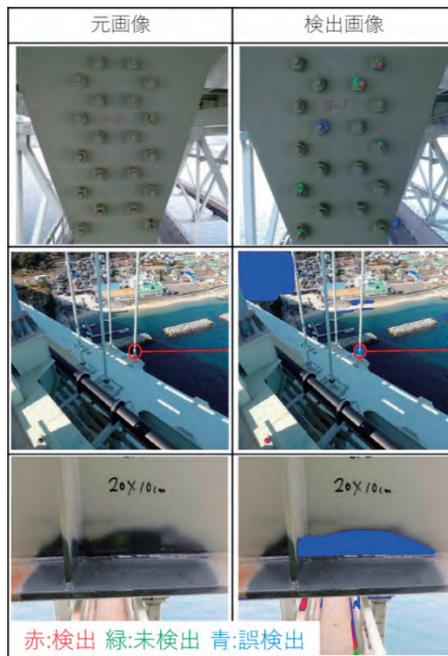
表-1 教師データ画像の内訳

Table1 Breakdown of the Training Data Images

腐食発生箇所	数量(枚)
鋼材	1,522
ボルト類	2,079
ケーブル・ロープ類	8
塗膜類	86
合計	3,695



(a)検出率の高い画像



(b)検出率の低い画像

図-3 腐食の検出結果(抜粋)

Fig.3 Excerpt of the Detection Results

表-2 検出結果を整理し作成した混同行列

Table2 Confusion matrix created by organizing the detection results

		AIの予測	
		変状である	変状ではない
正解	変状である	TP (=0.004)	FP (=0.003)
	変状ではない	FN (=0.031)	TN (=0.962)

更に、混同行列から、AIの評価指標であるF値(F-score)を算出し、精度評価を実施した。F値は、トレードオフの関係にある適合率(Precision)と再現率(Recall)を用いてAIの精度を評価するための指標であり、式(1)で表す。適合率とは、実際にさび・腐食が発生している箇所に対して、AIがどの程度検出できているかを示す指標で、式(2)により表す。再現率とは、AIに腐食として検出されたもののなかで、実際に腐食が発生しているのはどの程度の割合なのかを表す指標で、式(3)により表す。

$$F\text{-score} = \frac{2 \times (\text{Precision} \times \text{Recall})}{\text{Precision} + \text{Recall}} \quad (1)$$

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP + FP} \quad (2)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{TP + FN} \quad (3)$$

F値は0~1で表され、1に近い値であるほど適合率・再現率ともに高い精度であるとされるが、検出結果から得られたF値は0.191であり、検出精度の向上を図る必要があったため、機械学習を行うこととした。

(3) 検出精度の向上

精度評価により得られたF値は0.191であり、検出精度の向上が必要と判断したため、データ拡張を実施した。データ拡張とは、既存の教師データを変換し、新たな教師データを生成してデータ量を増加させる手法である。また、教師データの学習回数を調整することで検出精度の向上を図った。

1) データ拡張

F値が低かった要因として、教師データの枚数が不足していた可能性が考えられる。この課題を解決するために、CutMix¹⁾と呼ばれる機械学習を採用した。CutMixは、変状画像から切り取った領域を別の変状画像に移植することで新たな教師データを生成するデータ拡張手法であり(図-4)、プログラムにより自動で実施される。本稿では、AIが学習した教師データを対象にCutMixを1回、2回、3回と回数を変化させて適用し、精度評価を行った。なお、1回目のCutMixは、前項の腐食検出時点で腐食を適切に検出できなかった教師データを対象に適用し、2回目及び3回目においては、CutMixを適用してもなお腐食を検出できなかったCutMix画像を含む教師データを対象に適用した。CutMixの回数を変化させ、精度評価を行った結果と教師データ枚数を表-3に示す。

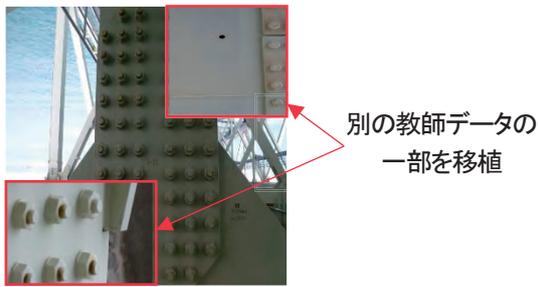


図-4 CutMixによるデータ拡張の例

Fig.4 An Example of Data Augmentation Using CutMix

表-3 CutMixを複数回実施した結果と教師データ枚数

Table3 Results of Multiple CutMix Applications and Training Data Count

CutMix 実施回数 (回)	TP	FP	FN	TN	F値	教師データ (枚)	
						CutMix無	CutMix有
0	0.004	0.003	0.031	0.962	0.191	3,695	0
1	0.014	0.016	0.021	0.949	0.423	3,695	39,025
2	0.012	0.014	0.023	0.951	0.376	3,695	73,685
3	0.011	0.013	0.024	0.953	0.376	3,695	102,520

既存の教師データに対してCutMixを1回適用した結果、F値が向上した。しかし、CutMixを2回以上適用した場合にはF値の更なる向上は見られなかった。このことから、CutMixは複数回適用する必要性はなく、1回の実施が妥当であると判断した。

2) 学習回数の最適化

前項の結果を踏まえ、CutMixの適用回数を1回に固定し、学習回数を変化させて、再度、精度検証を実施した。当初、学習回数を4,000回(約1時間)に設定していたが、これを50,000回(約8時間)に増加させた結果、F値が0.677まで向上したことを確認した(表-4)。一方、学習回数を500,000回(約3日半)に増加させてもF値に顕著な増加は見られなかった。

これらの結果から、CutMixは1回、学習回数については、学習時間の増加を考慮すると、50,000回に設定することが妥当であると判断した。

表-4 学習回数を変化させた結果

Table4 Results with varying number of iterations

学習回数 (回)	TP	FP	FN	TN	F値
4000	0.014	0.016	0.021	0.949	0.423
50000	0.031	0.025	0.004	0.940	0.677
500000	0.030	0.020	0.005	0.945	0.706

2.3 大島大橋を対象とした検証

前述で構築したAIを用いて大島大橋の箱桁下面(図-5)を対象に腐食を検出させ、精度検証を実施した。

(1) 検出結果(大島大橋)

大島大橋で画像を取得し、腐食の検出を実施した結果、腐食はほとんど検出されなかった。この要因として、AIの学習に使用した明石海峡大橋の学習データに類似した画像が、大島大橋で取得した画像に含まれていなかった可能性が考えられる。

(2) 検出結果の検証

AIに大島大橋の腐食画像1,683枚(Cutmixなし:189枚 Cutmixあり:1,494枚)を教師データとして学習させ、再度AIにより検出した結果、検出精度は向上し、F値は0.6以上の値となった(表-5)。しかし、データ拡張により検出精度の向上は確認できたが、影や隙間等の暗い部分や補修済み箇所、付着している汚れをさびとして誤検出しているケースも見受けられた。大島大橋における取得画像の腐食検出結果の抜粋を図-6に示す。なお、白黒画像上の白い箇所がAIにより腐食として検出された箇所である。

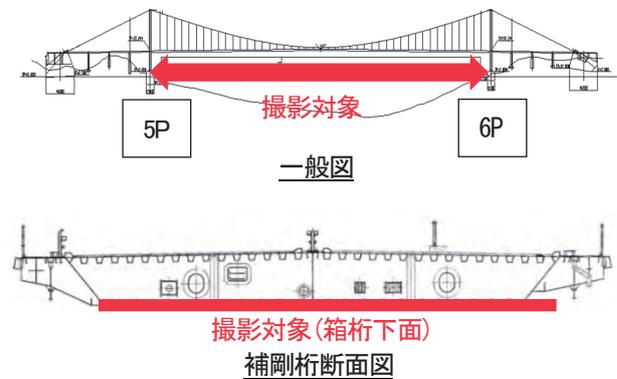


図-5 点検対象箇所(大島大橋)

Fig.5 Inspection Target Location (Oshima Bridge)

表-5 大島大橋の画像を学習させたAIのF値

Table5 F1-score of the AI trained on images of the Oshima Bridge

TP	FP	FN	TN	F値
0.034	0.0016	0.011	0.9939	0.720



a)検出結果(良好) b)検出結果(影の誤検出)

図-6 取得画像の腐食検出結果

Fig.6 Detection Results of the Defects in the Captured Images

3. 現地画像・腐食面積・数量・位置情報の取得

長大橋の点検において、近接目視点検による腐食の発見及び記録作業に代わる方法として、前述のAIを活用した効率的な点検を実現するため、現地画像の効率的な取得方法の検討を行った。また、取得した画像から検出された腐食の面積及び数量の取得作業の効率化を目的として、輪郭追跡処理及び膨張処理を用いた算出方法について検討を行った。更に、変状の位置情報を取得し、プラットフォームとする長大橋3次元モデル(BIM/CIM)と連携させる手法について、検討を行った。

3.1 効率的な現地画像の取得方法

(1) 動画撮影

大島大橋には桁の点検・補修作業用に桁外面点検補修作業車が常設されている。この点検補修作業車上にカメラを設置し、橋軸方向に沿って走行させながら動画撮影を行った。撮影は5Pから6P間で作業車を往復させて実施し、往路では箱桁下フランジ面の腐食箇所を確認し、その結果に基づいてカメラの設置位置を調整した。復路では箱桁下フランジ面の動画撮影を行い、カメラの設置距離と撮影倍率を一定に保つように撮影した。なお、使用したカメラ及び画素数を表-6に、動画撮影状況を図-7に示す。

表-6 使用カメラ及び画素数

Table 6 Applied Camera and the Number of Pixels

使用カメラ	画素数
iPad (第7世代)	1,280 × 720
Insta360	1,920 × 1,080
α7IV	1,920 × 1,080



図-7 動画撮影状況

Fig.7 Video Recording in Progress

(2) 静止画の抽出

撮影した動画から、以下の手順で静止画の抽出を行った。

1) 形状寸法が分かる部材の確認

添接板など、形状寸法が判明している部材が撮影されている静止画を選定し、対象物のピクセル数を確認した。

2) 画素数と寸法の関係の確認

図面から部材の寸法を確認し、画素数と寸法の関係を基に、1ピクセルあたりの長さ及び静止画1枚の撮影範囲

を算出した。

3) フレーム間隔の設定

動画のフレームレート(FPS: 29.97フレーム/秒)、桁外面作業車の最高速度(30 m/分)、及び静止画1枚の橋軸方向の撮影範囲(1066.7 mm)を基に、画像抽出のためのフレーム間隔を設定した。なお、抽出漏れを防ぐため、画像のオーバーラップ率を50%とした。フレーム間隔の計算式は式(4)のとおりである。

$$\begin{aligned} \text{フレーム間隔} &= \frac{\text{撮影範囲(橋軸方向)(mm)}}{\text{作業車の速度(mm/s)}} \times \text{FPS} \times (1 - \text{オーバーラップ率}) \quad (4) \\ &= 1066.7/500 \times 29.97 \times (1 - 0.5) = 31.968 \end{aligned}$$

以上より、30フレームごとに1枚の静止画を抽出する設定とした。

4) 静止画の抽出

得られたフレーム間隔で画像を切り出し、静止画を抽出した。

3.2 輪郭追跡処理による腐食面積の算出方法

AIにより検出された腐食について、その範囲を定量化するために、画像から腐食範囲を検出する輪郭追跡処理技術を適用した。この処理は、画像中にある物体や領域の境界やエッジを検出し、その形状及び面積をピクセル単位で把握することができるものである。腐食面積の算出イメージ図を図-8に示す。

(1) 二値化処理

AIにより検出した腐食の領域を白に変換し、その部分以外を黒に変換することで画像を二値化した。

(2) 輪郭の検出

二値化処理が施された画像の白い領域と黒い領域の境界を抽出した。具体的には、境界線に沿った外周を輪郭として捉え、対象領域を1つの集合体として定義した。これにより、腐食の形状及び面積を数値的に把握することが可能となる。

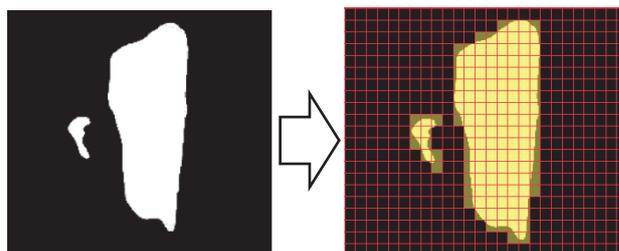


図-8 腐食面積算出イメージ

Fig.8 Corroded Area Calculation Image

3.3 膨張処理による数量の算出

狭小範囲で点在する腐食については、データ管理の都合上、それらをグループ化し、1つの変状として扱う場合がある。本稿では、変状の数量を算出する際に、実際の腐食発生状況と塗装補修作業をイメージして以下の3つのケースに分類し、必要に応じて複数の腐食を1つの変状に集約するために膨張処理を適用した。膨張処理と

は、隙間や空白のある領域を補完するために、指定領域を拡大することで、隙間を埋める画像処理技術を指す。

(1)単一で連続した腐食領域

単一の連続した領域として明確に認識可能な腐食については、膨張処理を必要せず、輪郭追跡処理によって、その形状及び面積を直接計測する。

(2)腐食領域内に健全部が含まれる場合

腐食領域内に直径50mm以下の健全部が含まれる場合、補修時にはその健全部も含めて補修されることを考慮し、膨張処理によって健全部を含む領域を腐食部として計上する。

(3)狭小範囲に腐食が点在する領域

点在する腐食同士の間隔が縦、横方向ともに50mm未満であれば、膨張処理を用いて、1つの変状として計上する。

変状の計上例を図-9に示す。



図-9 AIが検出した変状の計上例
Fig.9 An example of damage detected by AI

3.4 オプティカルフローによる変状位置の算出

AIにより検出された変状の位置情報の取得方法について検討した。

(1)展開画像の作成

前述の手法で取得した大島大橋箱桁下面の画像を基に、オプティカルフロー²⁾を用いた画像融合技術で展開画像を生成した。オプティカルフローは、連続する画像フレーム間の各ピクセルの移動方向と移動量を計算し、物体や背景の動きを解析する技術である。まずはオリジナル画像についてオプティカルフローにより展開画像を作成し、二値化処理後の画像においてはオリジナル画像と同じ移動量を適用することで、展開画像を作成した(図-10)。

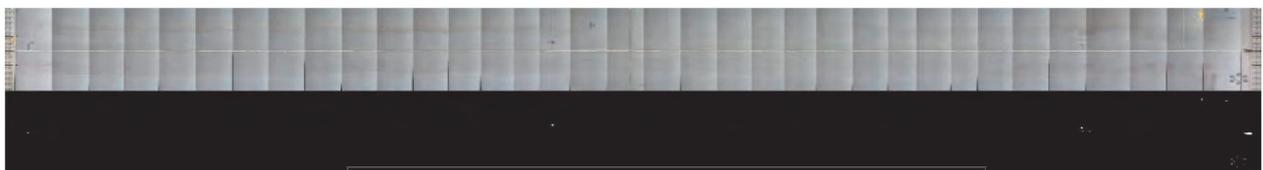


図-10 オプティカルフローにより生成した展開画像
Fig.10 Unfolded Image Generated by Optical Flow



図-11 変状の図心位置を展開画像へプロット
Fig.11 Plotting the Centroid Positions of Defects on the Unfolded Image

(2)位置情報の取得

生成された展開画像の座標データを基に変状の位置情報を取得した。展開画像のピクセルと実寸法の関係から、検出された腐食の面積及び図心位置を算出のうえ、これを実寸法に換算して位置情報を特定した。また、複数の腐食を1つの変状としてグループ化する場合には、グループの図心を算出し、その位置を展開画像上に反映した。この結果を表-7及び図-11に示す。また、得られた座標をBIM/CIM座標系に変換することで、大島大橋のBIM/CIMモデルへのマッピングが可能であることを確認した(図-12)。

表-7 変状の図心位置と面積の算出結果

Table7 Calculation Results of the Centroid Position and the Area of Defects

No.	Px(px)	Py(px)	x(mm)	y(mm)	Area (mm ²)
1	55	554	105	1002	126
2	227	646	435	1168	431
3	3674	774	7036	1399	155
4	5469	523	10473	946	923
5	6978	399	13363	721	25
6	10778	563	20640	1018	2277
7	11943	133	22871	240	557
8	12221	160	23403	289	615
9	12406	657	23757	1188	6865
10	12302	1091	23558	1973	3455

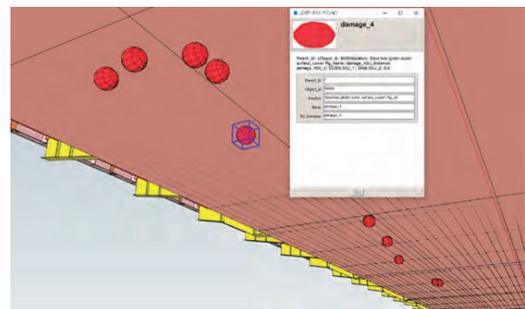


図-12 CIMへの位置情報マッピング
Fig.12 Location information mapped on BIM

4. おわりに

本稿では、IRIS登録データと大島大橋で取得した画像を活用したAIの構築及び検証に加え、AIで検出した腐食の数量・面積・位置情報の取得手法について検討を行った。これにより得られた成果を以下に示す。

- ①データ拡張手法及び学習時間の最適化により、腐食検出精度の向上が可能であることを確認した。
- ②撮影した動画から抽出した静止画(変状画像)より、AIを用いて腐食の検出が可能であることを確認した。
- ③腐食箇所の面積や数量、位置情報を算出しBIM/CIMとの連携が可能であることを確認した。

今後は、AIによる腐食検出精度の更なる向上を目的として教師データの増強を行うとともに、検出された腐食の原因などをAIが推定することで、点検結果報告資料の作成を支援する説明型AI³⁾の構築を目指す。また、箱桁下面のような平面形状に限らず、トラス構造のような複雑な部材形状に対しても、部材全周囲の画像を効率的に取可能とする技術の確立について検討を進める予定である。

謝辞

本論は、東京大学 全先生及び株式会社IHIインフラシステムとの共同研究の一環として実施されたものである。

両者には、技術的助言やデータ提供をはじめ、研究遂行における多大なるご支援を賜り、深謝する。また、研究過程における建設的な議論及び実務的なご助力により、本研究の進展に多大な貢献をいただいたことを記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) Kubo S, Yamane T, and Chun P.J. : Study on Accuracy Improvement of Slope Failure Region Detection Using Mask R-CNN with Augmentation Method, Sensors, Vol.22, Issue 17, 6412, 2022
- 2) Sharmin, N. and Brad, R. : Optimal Filter Estimation for Lucas-Kanade Optical Flow, Sensors, Vol.12, Issue 9 12694-12709, 2012.
- 3) Chun, P.J., Yamane, T., and Maemura, Y. : A deep learning - based image captioning method to automatically generate comprehensive explanations of bridge damage. Computer - Aided Civil and Infrastructure Engineering, Vol.37, Issue11, pp.1387-1401, 2022

多々羅大橋のケーブル近接点検における取組

Efforts for close visual inspection of the Tatara bridge cables

小坂 祐輔 Yusuke Kosaka 本郷 誠人 Masato Hongo

保全部 道路橋梁保全課

企画部 企画課
(前)保全部 橋梁保全グループ

概要

斜張橋ケーブルの点検は、現状では、主塔、路面上及び管理路からアクセス可能な範囲での点検や高画質カメラ等を用いて実施している。点検範囲は、路面から100mを超える高所となることから、全長にわたっての近接目視が難しい。

本稿では、本州四国連絡橋の斜張橋のうち、多々羅大橋のケーブル表面及び内部の素線の状態を把握するために実施した詳細調査及び今後のケーブル近接点検手法への取組みについて紹介する。

The inspection of stay cables is currently conducted within the range accessible from the main tower, road surface, and maintenanceways, as well as using high-resolution cameras and other methods. However, as the height of cables is often more than 100 meters above the road surface, it is difficult to conduct close visual inspection along the entire cable.

In this paper, the detailed investigation conducted to assess the surface condition of the cables and the internal wire state of the Tatara Bridge, and the efforts for close visual inspection methods of stay cables are described.

1. はじめに

斜張橋ケーブルに用いられる被覆平行線ケーブルは、複数の垂鉛めっき鋼線(以下「素線」という。)を束ね、表面をポリエチレン被覆したものが多く採用されており、本州四国連絡橋の多々羅大橋でも採用されている。

多々羅大橋は、1999年に供用した西瀬戸自動車道の生口島と大三島を結ぶ、中央支間長890mの完成当時世界最長の斜張橋である。ケーブルは、中央径間及び側径間ともに2面吊り21段のマルチファン型であり、各ケーブルは、直径7mmの素線を151~379本束ね、表面をポリエチレン被覆したものを採用している。ケーブル表面には、風雨時におけるレインバイブレーションが懸念されることから、インデント加工(写真-1)が施されている。ケーブル径はφ108~170mmであり、長さは最短で108m、最長のものは460mに達する。また、ケーブル傾斜角は、約20~75度となっている(図-1)。

多々羅大橋のケーブル点検は、現状では、主塔、路面上及び管理路からアクセス可能な範囲での点検や近接目視と同等である高画質カメラを用いて実施している(写真-2)。点検範囲は、路面から100mを超える高所となることから、全長にわたっての近接目視が難しい。しか

し、ケーブル全長にわたって健全性評価を行うためには、近接目視によるケーブル表面及び内部の状態把握は、必要不可欠である。

本稿では、多々羅大橋のケーブル点検で確認されたケーブル表面のインデント加工部の微細な亀裂に関する詳細調査結果とケーブル全長にわたる新たな近接点検手法の開発について報告する。

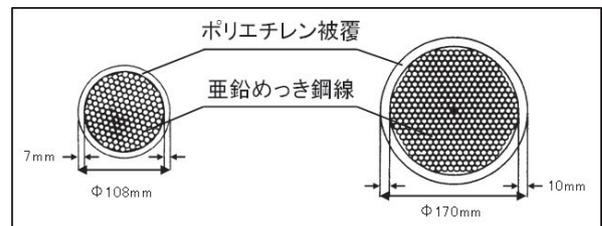


図-1 ケーブル断面図
Fig.1 Cross-Section of the cable

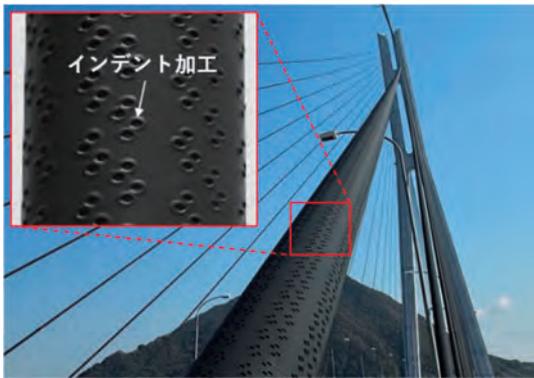


写真-1 インデント加工
Photo 1 Indentation Processing



写真-2 点検状況
Photo 2 Inspection Status

2. 定期点検

2017年の定期点検において、路面付近の一部のケーブル表面のインデント加工部において微細な亀裂が確認された。そのため、ケーブル全数(168本)を対象に、路面から2mの高さまでの亀裂調査を行ったところ、47本(約30%)でインデント加工部の亀裂が確認された(図-2)。亀裂の発生形態としては、インデント円周端や、インデント底部の円周に沿ったものが多く見られた(写真-3)。また、亀裂の幅は最大0.1mm程度で、側径間かつケーブル上面に多く集中していた。

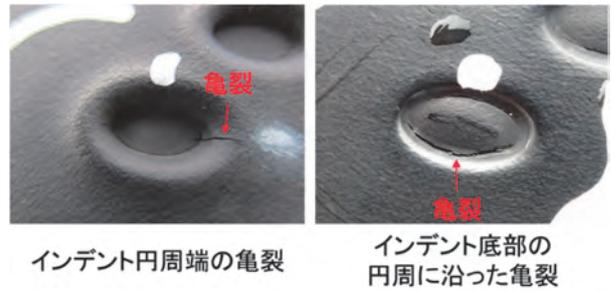


写真-3 インデント加工部の亀裂
Photo 3 Cracks in the Indentation Process Area

3. 詳細調査

ケーブル表面のインデント加工部に亀裂が確認されたことを受け、2018年から、ケーブル表面及び内部の素線の状態を把握する調査を行ってきた。以下にその調査内容と結果を示す。

3.1 ケーブル表面被覆調査

(1) 内容

インデント加工部の亀裂箇所の深さ及び破面の状態を確認するため、亀裂が確認された47本のケーブルのうち、上下線の側径間及び中央径間のうち、代表する各3本、計24本について、ケーブル表面の被覆を削孔し、深さ方向の断面観察を行った。

(2) 結果

インデント円周端とインデント底部の円周に沿った亀裂箇所の被覆断面には疲労亀裂特有のビーチマークが確認された(写真-4)。24本のうち、被覆厚さ(7~10mm)に対して、亀裂深さは最大で4mm(被覆厚10mm)であったが、素線まで達しているものはなかった。

また、削孔した24本のケーブル内部の素線の状態は、22本では、さびが見られず健全であったが、S4(下り線)とN6(上り線)の2本については、一部白さびやさびと思われる状況が確認された(写真-5)。

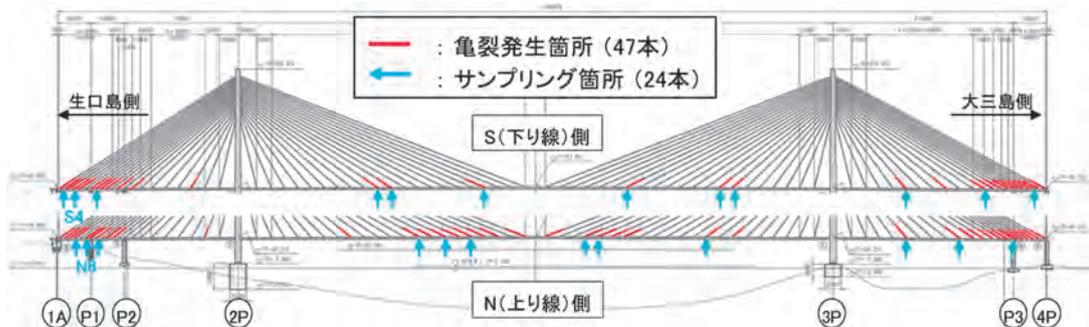


図-2 亀裂発生箇所
Fig.2 Crack Occurrence Location

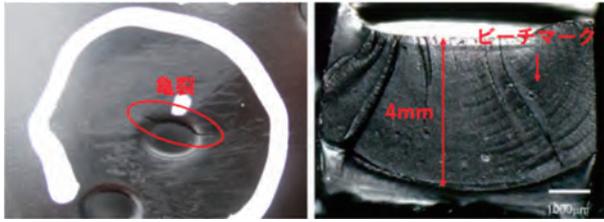


写真-4 亀裂箇所断面

Photo 4 Cross-Section of the Crack Location

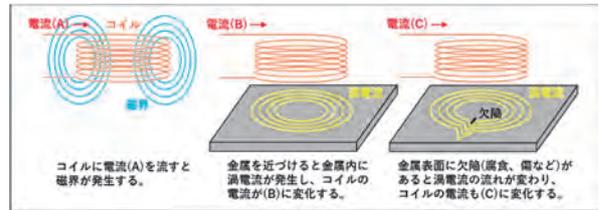


図-3 ECT原理

Fig.3 ECT Principle



写真-5 サンプル後の素線状況

Photo 5 Condition of the Wires After Sampling



写真-6 ECT測定状況

Photo 6 ECT Measurement Status

3.2 ケーブル被覆内部調査

(1) 内容

ケーブル被覆内部の素線の状態を把握するには、表面被覆を剥ぎ取る必要があるが、復旧方法を考えると現実的ではない。そのため、表面被覆を剥ぎ取る必要がなく、導電性の鋼線などを対象に、外側から磁力を与えた際に発生する渦電流の信号から、めっきの消耗度を表面被覆上から測定可能な非破壊検査手法である渦流探傷試験法 (Eddy Current Testing (以下「ECT」という。))を用いて調査を実施した(図-3)。ECT測定は、障害物(金属製保護カバー及び計測器)が設置されているケーブルを除くケーブル全数(162本)を対象とした(写真-6)。測定位置は、桁側定着部近傍の路面から近接可能な3.5m程度とした。

(2) 結果

調査の結果、亜鉛めっきの消耗と推定される信号分布が11本のケーブルから確認された(図-4)。信号は側径間でのみ確認されており、インデント加工部で確認された亀裂発見箇所と同様な傾向を示した。

3.3 ケーブルの部分開放調査

(1) 内容

3.1でインデント加工部の削孔によって素線にさびと思われる状況が確認されたケーブルとECT測定によって亜鉛めっきの消耗があると推定されたケーブルであるN6(上り線)について、双方の結果が照合するかどうか検証するために、表面被覆の部分開放を行った。開放規模は長さ150mm、幅は1/2周長とした。部分開放にあたっては、ECT測定結果より、路面から1~1.5mの亜鉛めっきの消耗があると推定された範囲(A, B)及び路面から2mの健全とみられる範囲(C)を対象に実施した(図-5)。

(2) 結果

部分開放の結果、削孔により、ケーブル全周にわたっ

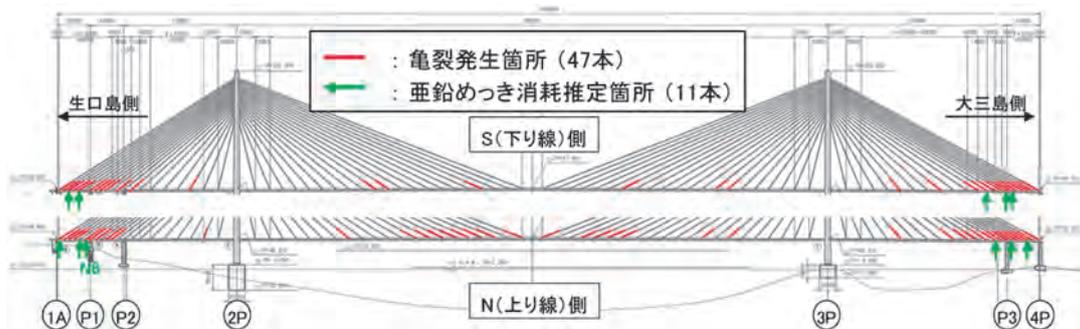


図-4 ECT測定結果(定着部)

Fig.4 ECT Measurement Results (Fixing Section)

て白さび及び赤さびが確認され、ケーブルの円周方向による違いは見られなかった。

3.1の調査とECT測定の結果との整合性は、検証の結果、部分開放によって確認された亜鉛めっきの消耗箇所とECT測定でめっき消耗有りと推定された範囲(A, B)がおおむね一致していることが確認された。

また、ECT測定で健全な信号分布を示した範囲(C)では、素線も健全であることを確認した(写真-7)。

ただし、ECT測定は、ケーブルの種類や形状等が渦電流信号に影響を及ぼすことから、対象とするケーブルによっては正確に内部状況を推定することが難しいと思われる。



図-5 ECT測定結果(N6(上り線))

Fig.5 ECT Measurement Results (N6 (Inbound Line))

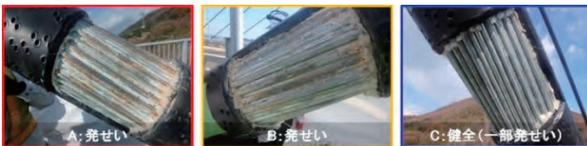


写真-7 開放調査結果

Photo 7 Internal cable inspection Results

3.4 ケーブル定着部の詳細調査

(1) 内容

外部からの腐食因子の侵入箇所としては、ケーブル表面被覆の亀裂等損傷箇所や、ケーブル定着部(主塔・桁)が考えられる。部分開放を実施したN6(上り線)では、素線のさびが桁側定着部付近で確認されたことから、桁側定着部のケーブルカバー及び緩衝材を撤去し、カメラを用いて内部調査を行った。

(2) 結果

内部調査の結果、鋼管内では一部傷が確認されたものの、素線に達するような状況は見られなかった。鋼管終端部については、滞水跡とみられる様子が確認された。ただし、完成時からケーブルカバーが設置されており、水が浸入しづらい構造であるため、供用中のどの時点で

滞水していたかは不明であった(図-6)。

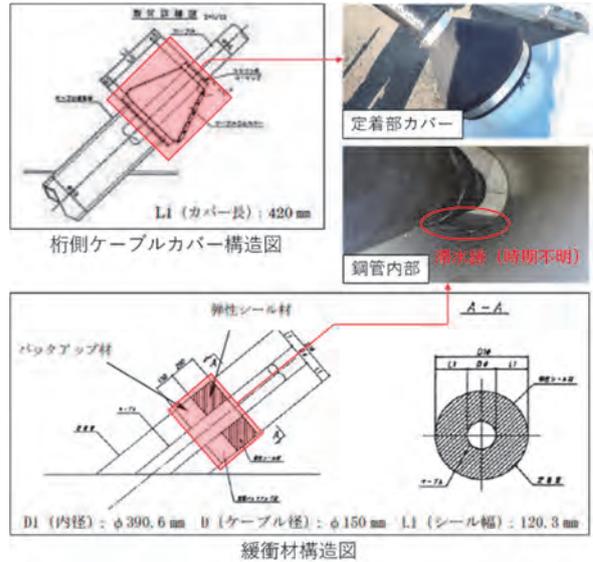


図-6 ケーブル定着部構造図

Fig.6 Cable Anchorage Structure Diagram

3.5 ケーブル内温湿度計測

(1) 内容

ケーブル内部の腐食環境を把握するため、3.1で削孔した24本のうち、9本について温湿度センサーを設置し、経時的な温湿度計測を行った(図-7)。センサーを設置したケーブルは、上下線の側径間及び中央径間のケーブルを各1本と素線にさびが確認されたN6(上り線)を加えた計9本を選定した。また、高さ方向の違いを把握するため、N6(上り線)については、定着部近傍(4箇所)及び路面より約15mの位置(1箇所)を削孔し、計5箇所センサーを設置した(図-8)。

(2) 結果

湿度計測の結果を図-9に示す。いずれのケーブルも1日の温度変化に対応して相対湿度が変動している一方、長期的にはおおむね一定の相対湿度を示していた。また、ケーブルによって相対湿度が大きく異なる傾向にあることが確認された。更に、選定したケーブルについて、いずれのケーブルも、温度変化に伴い絶対湿度が変化する傾向を示すことが明らかとなった(図-10)。この要因は、ケーブルが完全な密閉状態でない可能性も考えられるが、現状では、データ数が少ないことから、明らかにはできていない。

次に高さ方向による違いであるが、3.1でさびが確認された削孔箇所(N6G)より低い位置(N6GG)の削孔時に素線のさびが確認され、N6Gより高い位置(N6T, N6TT, N6H)では、素線表面に変状等はみられず健全な状態であり、桁側定着部から離れるほど相対湿度が低くなる傾向を示した(図-11)。なお、高湿度でありながら素線が健全な箇所も確認された。

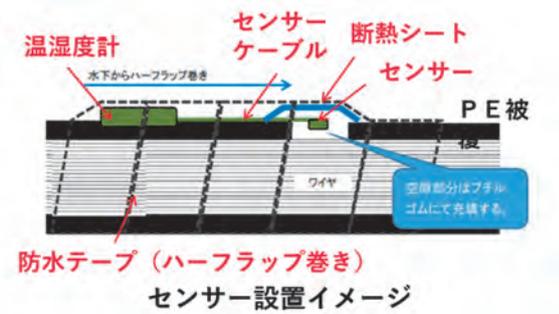


図-7 温湿度センサー設置図

Fig.7 Temperature and Humidity Sensor Installation

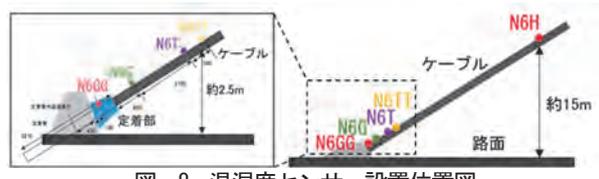


Fig.8 Location of Temperature and Humidity Sensor

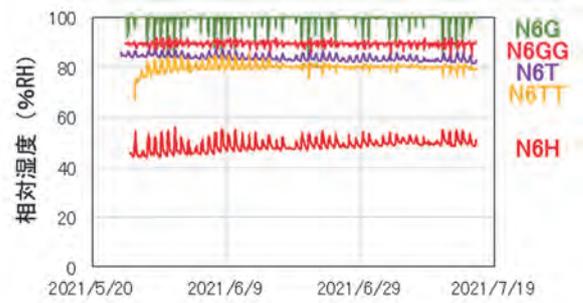


図-11 相対湿度計測結果 (N6(上り線))

Fig.11 Relative Humidity Measurement Results (N6 (Upward Line))

4. 新たな点検手法の開発

4.1 概要

2018年より、近接困難な高所箇所も含めた詳細な状況把握を目的に、ケーブル全長及び全周の状態が把握可能な点検手法の検討を重ね、斜張橋ケーブル点検装置(以下「点検装置」という。)を開発した。この点検装置は4つの駆動輪でケーブルを上下から挟み込むことでケーブルに組み付き、ケーブル外周に60°間隔で設置した6台のカメラでケーブル表面の画像を撮影しながら走行する(写真-8)。対応可能なケーブルはφ100~200mm、ケーブル傾斜角20~75°程度、最大走行距離は460mである。現地実橋試験で、多々羅大橋の最長ケーブル及び最大勾配ケーブルの点検実施が可能であることを確認している(写真-9)。点検装置概略外寸は幅0.5m×高さ1.0m×長さ1.5m程度、バッテリー搭載時の点検装置総重量は100kg程度である。また、点検装置でECTコイルを牽引して同時

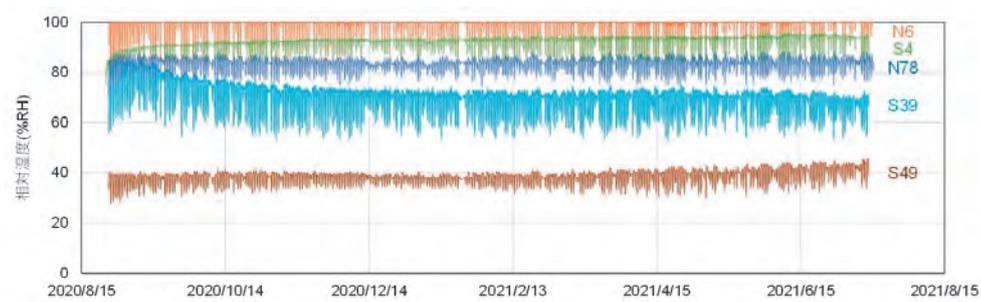


図-9 相対湿度計測結果

Fig.9 Relative Humidity Measurement Results

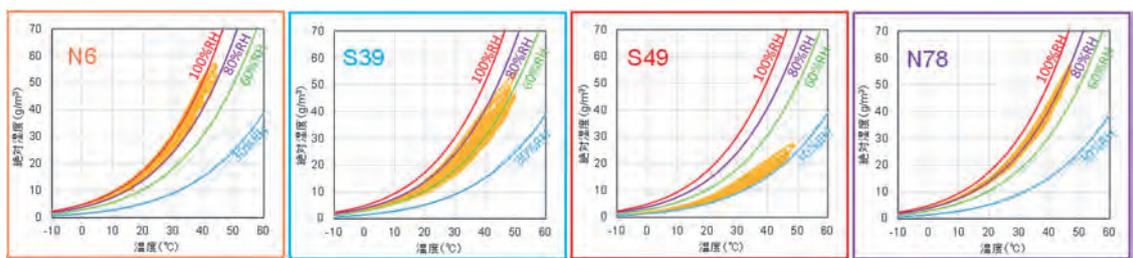


図-10 絶対湿度計測結果

Fig.10 Absolute Humidity Measurement Results

にECT測定を実施することが可能である。点検装置の概要を表-1に示す。

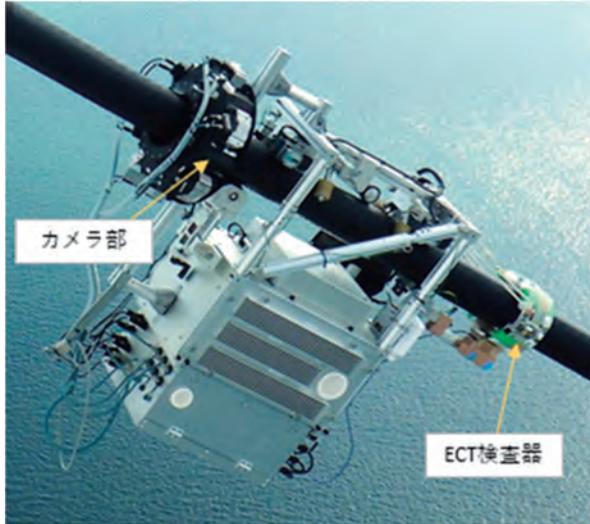


写真-8 点検装置
Photo 8 Inspection Equipment



写真-9 点検装置走行状況
Photo 9 Running state of Inspection Equipment

表-1 点検装置概要
Table 1 Overview of Inspection Equipment

寸法	W450×H1000×L1400
重量	100 kg
カメラ	6台(カラー)
対応ケーブル径	100mm~180mm
傾斜角	20° ~75°
走行距離	460m
検査速度	4m/min
駆動方式	上下タイヤ駆動(4輪)
締付力	100~250 N(傾斜角・表面状態に応じて要調整)

4.2 取得データ

点検装置に搭載されているカメラは、幅0.1mm、長さ1mm程度の亀裂検出のため、0.1mm/pixelの画像取得が可能な性能を有している(写真-10)。ケーブル全体では膨大な数のインデント加工部が点検対象となるため、撮影画像から自動でインデント加工部を抽出し、抽出したインデント加工部の微小亀裂を判別するためのAI処理ソフトも併せて開発した。現時点では、微小亀裂検出AIの精

度に課題が残るが、今後、撮影データを蓄積し、AIの学習を繰り返すことで、微小亀裂の検出精度を向上させてゆきたい。



写真-10 取得画像
Photo 10 Acquired Image

5. おわりに

今回は、多々羅大橋で実施した調査内容とケーブル全長の状況把握のための点検手法の開発について報告した。斜張橋ケーブルの点検は、現状では、主塔、路面上及び管理路からアクセス可能な範囲での点検や高画質カメラ等を用いて行っていたが、ケーブル全長にわたって、近接目視と同等な画像が得られる点検装置が開発され、実橋試験においてその有効性が確認された。また、多々羅大橋では供用から25年経過しているものの、素線表面に一部腐食が見られる程度であり、ケーブルが破断するような状態に至っていないことが確認できた。

今後は、定期点検に加え、今回開発された点検装置も用いながら、多々羅大橋のケーブル全長にわたる表面の状態把握に努めたい。

謝辞

本稿の内容については、IHIグループ、神鋼鋼線工業株式会社、及びJB本四高速グループが一体となってこれまで取り組んできた斜張橋ケーブルの詳細調査、斜張橋ケーブル点検装置の開発の成果について取りまとめたものである。ここに記して関係者の皆様に感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 本郷誠人, 後藤稜平, 北村耕一, 瀬戸口雄介, 河村睦: 本州四国連絡橋の斜張橋ケーブル点検における取組, 土木学会第79回年次学術講演会, I-15, 2024.
- 2) 北村耕一, 瀬戸口雄介, 尾池伸一, 河村睦, 本郷誠人, 後藤稜平: ケーブル外観検査装置の開発, 土木学会第79回年次学術講演会, I-15, 2024.

第12回 国際吊構造橋梁管理者会議 (ICSBOC 2024)

12th International cable supported bridge operators conference
(ICSBOC 2024)

2024年10月6日から10日にかけて、国際吊構造橋梁管理者会議(International Cable Supported Bridge Operators Conference : ICSBOC)がアメリカのニューヨーク州で開催されました。

ICSBOCは、1991年にアメリカで開催された第1回目の会議を皮切りに、2~3年に1回の頻度で開催されています。日本でも過去に3回ほど本四高速主催の下開催しており、今回で12回目の開催となります。同会議は、吊橋、斜張橋など吊構造橋梁の管理者が一堂に会し、論文発表等を通じて、長大橋の維持管理方法や新技術の開発、研究成果等の発表及び意見交換を行うものであり、多くの橋梁管理者が会議に参加しました。

会議内容については、既設橋へのケーブル除湿システムや構造健全性モニタリングシステム(SHMS)の導入など、長大橋の維持管理に関する現在の課題から最先端技術の適用まで、多岐にわたる論文が発表されました。特に斜張橋のケーブル交換については目新しい内容でした。スウェーデンに位置するストレームスンド橋は、1956年に開通し建設当時は世界一の斜張橋でした。ケーブル種類はロックドコイルタイプであり、ケーブル定着部付近で腐食や一部破断が散見されました。そこで、一時的な通行止め等を行いながら、全16本のケーブル交換作業を実施しました。また、交換作業後、ウェイクギャロッピング対策として、ケーブルの振動を抑制するためのダンパーも設置しました。

本四高速からは技術支援室の小林が「因島大橋の耐震補強設計(Seismic Retrofit Design of Suspension Bridge, Innoshima Bridge)」について、安全防災・技術部防災課(兼)技術支援室の下瀬が「国内最大規模の粘性ダンパーを用いた耐震補強(Seismic Retrofit using the Largest Viscous Damper in Japan)」について技術発表を行いました。

その他、基調講演では、「北米の吊橋における修復設計及び施工(Adaptation and the practice of design /rehabilitation of cable supported bridges in North America)」, パネルディスカッションでは、「技術者の知見」をテーマに各橋梁管理者が経験により得た知識、考え方や意見の共有を行いました。

国際会議終了後には、橋梁の維持管理に携わる方々のみで意見交換会を開催しました。吊橋に関する主ケーブルの保全方法やハンガーロープの交換方法等、各国の管理者が現在頭を悩ませている問題を中心に議論が行われました。特に、主ケーブルの除湿方法については多くの方が興味を持っていたため、本四高速から西谷 EE が「吊橋ケーブルの送気乾燥による防食システム」につい

て情報提供を行い、本四連絡橋における送気システムの送・排気方法に関する課題を共有しました。

テクニカルツアーとして、ベアーマウンテン橋を見学しました。ベアーマウンテン橋はハドソン川にかかる吊橋で、2024年11月に開通100周年を迎えました。片側1車線で両側に歩道部を併設しており、主塔自体は陸上にあります。また、橋桁や主塔など各部材の接合部には主にリベットを使用しており、供用後、経年劣化により片側の主塔が中央径間側に傾いたため、主ケーブル近傍に新たなケーブル部材が設置されました。

次回のICSBOC 2026は、マルメー(スウェーデン)で開催される予定です。

(安全防災・技術部防災課(兼)技術支援室 下瀬恒大)



写真-1 開会式



写真-2 本四高速の発表(小林)



写真-3 ベアーマウンテン橋

長大橋建設・維持管理研修(デンマーク・スウェーデン)

Training of long-span bridge construction, operation and maintenance in Denmark and Sweden

2024年8月19日～9月6日の日程で、デンマークのストアストローム橋及びグレートベルトリンク、並びにデンマーク及びスウェーデンのオーレスンリンクにおいて5日ずつ、長大橋の建設・維持管理に関して研修を受けました。

ストアストローム橋は、デンマークのシェラン島とファルスター島を結ぶ道路鉄道併用橋です。1937年に供用開始した旧橋が老朽化したため、新たに斜張橋(橋長320m, 最大支間長160m)を含む全長3832mの橋梁を建設中です。研修では、建設現場の検査立会に同行し、長大橋建設技術を学習しました。研修時の工事状況は、コンクリート製の塔架設及び高架橋部のPC桁架設でした。塔の鉄筋工では、直径40mmの主鉄筋を配筋しており、カプラーによる機械式接手の施工状況や検査などを現場見学できました。塔の設計の特徴に、プレストレスが挙げられます。本橋は自動車と鉄道の両方が橋面を走行する設計です。鉄道の設計荷重が自動車よりも大きいことから、塔が鉄道側にたわむことを防止するために、塔の自動車用道路側に橋軸直角方向のプレストレスが導入されています。

オーレスンリンクは、デンマークとスウェーデンを結ぶ道路・鉄道であり、斜張橋(橋長1092m, 最大支間長490m, 2000年開通)を有しています。また、瀬戸大橋と姉妹橋を締結しています。本橋は、2018年から鋼製トラス桁の全面塗替塗装を施工しています。本工事の特徴として、仮設足場となるモジュラー式の近接ガントリーを製作したことが挙げられます。これにより、桁内面及び外面への近接足場、鉄道への飛散防止、高圧電線の防護を容易に仮設することができます。また、塗替塗料には環境に配慮した水性塗料が使用されています。更に、本州四国連絡橋ではHBE塗料規格として高耐久性ふっ素樹脂塗料上塗を使用していますが、欧州では規制によりふっ素塗料が使用できないため、本橋の上塗り塗料にはポリウレタン塗料が使用されています。

グレートベルトリンクは、デンマークのシェラン島とフィン島を結ぶ道路・鉄道であり、吊橋(橋長2700m, 最大支間長1624m, 1998年開通)を有しています。また、明石海峡大橋と姉妹橋を締結しています。本橋では、維持管理にデジタル技術を積極活用している点が特徴的でした。例えば、UAVカメラとAIを活用した点検が推進されています。UAVカメラで撮影した画像を3次元モデルに投影し、AIによる変状箇所の検出及び画像への重ね合わせ並びに変状の分類を行うシステムを開発しています。高架橋部のコンクリート橋脚の点検で実用化して

おり、2024年度末にはコンクリート主塔部にも適用される予定です。ただし、現状の手法では、構造物表面の外観情報のみ取得しているため、コンクリートの浮きは検出できないなどの課題が残る状況です。他のデジタル化の取組として、Sund & Belt社が管理する全ての構造物がBIMモデル化及び点群データ化されており、同社が使用しているアセットマネジメントシステムの中でGIS、現地写真、点群モデル及びBIMモデルが連携され、オフィスから現地状況の確認や寸法の計測などが可能となっています。

本研修では、普段の業務で経験することのできない長大橋建設現場やデジタル技術を活用した維持管理に加えて、英語による技術的なディスカッションなど様々なことを学ぶことができ、非常に貴重な機会となりました。

(技術支援室 小林弘昌)



図-1 (左)ストアストローム橋の完成イメージ、(右)塔の架設状況



写真-1 (左)オーレスン橋、(右)近接ガントリーの仮設状況

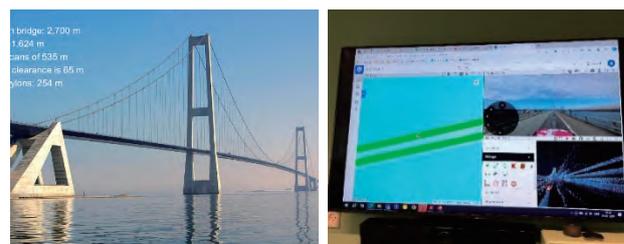


写真-2 (左)グレートベルト橋、(右)アセットマネジメントシステム

メコン川に架かる斜張橋

Cable-stayed bridges across Mekong River

メコン川は東南アジア最長の国際河川であり、その長さは約 4,500km. 日本で一番長い信濃川の約 12 倍以上あります。チベット高原に源流を発し、中国の雲南省を通り、タイ・ラオス国境、カンボジアそしてベトナムを流れ、南シナ海に至ります。メコン川流域の東南アジア諸国における持続可能な発展のために、この大河を渡る長大橋の建設支援が日本の ODA にて実施されてきました(図-1)。現在、長期的な視点からの維持管理の重要性を各国政府に認識してもらうとともに、今後、技術支援業務の受注を目指し、当社の有する先進的な技術等を広報するために、各国政府関係者と技術交流を始めています。

ラオス・タイ国境では、第二ラオス・タイ友好橋(写真-1)の開通によって、ベトナム、ラオス及びタイを東西に結ぶ経済回廊が完成、メコン川南北の船舶による交通に加え、人的・物的交流を活性化し、同地域の発展に寄与しています。

カンボジアには、きずな橋及びつばさ橋の二橋が日本の ODA により建設されています。きずな橋はカンボジア初のメコン川を渡る橋として 2001 年に開通、全長は 1,500m. つばさ橋(写真-2)は、ベトナム、カンボジア及びタイを結ぶ南部経済回廊の一部として、2015 年に開通しました。カンボジア国内では、この 2 橋がメコン川を横断する橋梁です。

メコン川が南シナ海に流れ込む手前、最大の支流ハウ川にかかる橋がベトナム国内に位置するカントー橋(写真-3)、全長は 2,750m. 東南アジアにある斜張橋の中では最大支間長を有する橋です。本橋により、ハノイ～南部地域を結ぶ国道 1A 号線の南北縦貫プロジェクトが完成、同国内の大動脈の一部となっています。

上記に紹介した橋梁はいずれも日本の無償・有償支援により建設されたものであり、東南アジア諸国の多くの斜張橋の建設に貢献してきました。

さて、東南アジア諸国政府関係者との最初の技術交流の場として、2022 年 10 月に当社主催により、神戸にて開催しました第 11 回国際吊構造橋梁管理者会議(ICSBOC)の地域部会の一つであるアジア地域ワークショップを活用しました。ワークショップは米欧亜の 3 地域において、2 年ごとに開催される ICSBOC の中間年に開催することになっています。2023 年 11 月、上記で紹介した長大橋の管理者を招き、橋梁の現状や技術的課題などを発表していただくことにより情報収集を行いました。参加していただいた方々は、現在、各国政府を代表する当社のカウンターパートとして、定期的に情報交換を行っています。

その後、将来的な技術支援業務の案件形成そして受注を目指し、各国の技術的な課題をニーズとして、シーズ



図-1 メコン川と長大橋位置図



写真-1 第二ラオス・タイ友好橋



写真-2 つばさ橋(カンボジア)

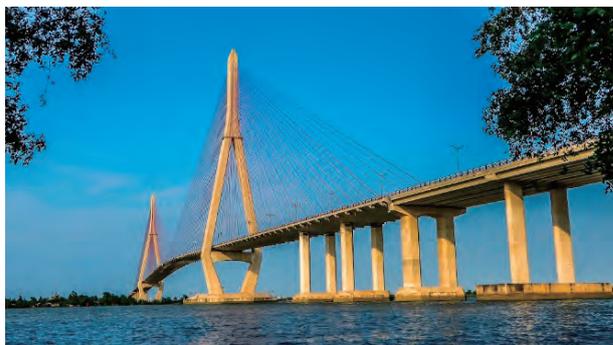


写真-3 カントー橋(ベトナム)

になり得る当社の技術等を広報すべく、セミナーやワークショップの開催を目的として、カウンターパートの協力を得ながら、上記三か国にタイを加えた四か国と意見交換・日程調整を行ってきました。第二ラオス・タイ友好橋など多くの長大橋はタイとラオスの国境であるメコン川に建設されており、これらは、両国が維持管理費を負担する国際管理となっています。

ワークショップや打合せを通じ、当社の維持管理に関する取組状況や技術等を効果的に広報できたこともあり、技術セミナーの開催に賛同をいただくことができ、これまで、全四か国にて技術セミナー(写真-4~6)を開催することができました。セミナーでは、当社の維持管理方針・予防保全のコンセプト、先進的な維持管理技術に加え、現地調査結果の紹介や今後の点検方針の提案などについて、意見交換を行ってきました。

今後、メコン川に架かる長大橋を管理する各国政府に対し、当社との直接的な契約も視野に入れながら、国際協力機構(JICA)を通じた技術協力プロジェクトなどの案件形成、また、外務省の東南アジア諸国への支援基金を活用した技術協力案件の形成など、当社単独もしくは国内民間コンサルタントと協力しながら、技術支援業務の受注を目指し取り組む予定です。

昨年 2023 年半ばに、海外技術支援に関する取組方針を検討し、そのロードマップに従い、東南アジア諸国の政府機関を対象として、本四公団時代から培ってきた維持管理技術を活用した長大橋管理者の持続可能なインフラ経営を支援することを目標に活動しています。技術交流にあたっては、若手社員の人材育成や現地 OJT の場としても活用しながら、当社技術の広報や営業活動を行っています。そして、JICA 案件業務数が減少している中、新規案件の発掘・提案から始め、業務受注や専門家派遣を目指しています。2024 年 9 月には、インドネシアに「特殊橋梁の維持管理能力強化に係る調査団」として、7 年ぶりに、JICA 短期専門家派遣を実現することができました。

また、欧米の長大橋管理者とは、ICSBOC やその国際ワークショップを活用したり、姉妹橋協定や技術協力協定を締結した長大橋管理者とはこれまでと同様、技術交流や技術広報を実施したり、更には、海外コンサルタントと連携しながら技術ニーズを収集、把握し、案件形成、業務への参画を検討しています。今回紹介した東南アジア諸国に対する活動とは異なる方針にて取り組んでおり、この活動においても、若手社員の育成の場を設け、活躍していただいています。

(エグゼクティブ・エキスパート 西谷雅弘)



写真-4 ラオス国 技術セミナー(2023. 11)



写真-5 タイ国 技術セミナー(2024. 3)



写真-6 カンボジア国 技術セミナー(2024. 11)

PIARC TC4.2 橋梁委員会

PIARC TC4.2 Bridges

2024年9月23日～27日の日程で、インドのベンガルールで、世界道路協会(PIARC : Permanent International Association of Road Congress)のTC4.2橋梁委員会及び合わせて開催された国際セミナー並びにテクニカルビジットに参加しました。

TC4.2 橋梁委員会は、PIARC 内に設けられた道路橋に関する技術委員会で、4年間で1サイクルとして活動しています。今回開催された橋梁委員会は、新たなサイクルとして2024年2月にフランスのパリで開催された第1回に続く第2回の委員会で、委員会には本四高速から遠藤経営計画部長と坂本が委員として参画しています。今回のサイクルでは、道路橋における5つの課題①橋梁点検、マネジメントへのデジタル技術の活用、②PC 橋梁ポストテンションシステムのモニタリングと維持管理、③道路橋の構造的冗長性を確保する要件とその評価手法、④構造破壊のフォレンジック(科学捜査)工学、⑤橋梁分野における脱炭素)に対し、課題ごとに設けたWGにおいて調査票の作成・配布、調査結果の分析等を行い、その成果を技術レポートとしてPIARC から発行するとともに、2027年に開催予定のカナダのバンクーバーでの世界道路会議にて活動報告を行う予定となっています。

第1回の委員会では、キックオフ会議の位置付けで約70名の委員が参加し、委員会の体制、課題、スケジュール等について議論が行われるとともに、テクニカルビジットとしてノルマンディー橋、タンカーヴィル橋等の視察を行いました。このうち、ノルマンディー橋では高架橋部での外ケーブルの腐食による破断に対し、ケーブル定着部での温度計測による破断調査や非破壊技術による一般部の破断調査が行われていました。

第2回の委員会では、約50名の委員が参加し、各WGの活動状況と今後のスケジュール、並びに今後の委員会のスケジュール等について議論が行われました。また、委員会に合わせて、インド陸運・国道省、インド道路協会、カルナータカ州交通事業局及びPIARCの共催で「橋梁管理の進化」をテーマとした国際セミナーが行われました。セミナーでは、橋梁建設での新材料の活用、橋梁管理での点検、維持管理戦略、道路橋のヘルスマニタリング等に関する発表がインドを含めた各国から行われ、本四高速からは遠藤部長が「地震地域での道路橋のレジリエンス」の題目で口頭発表しました。テクニカルビジットでは、ベンガルール市内と空港を結ぶ鉄道橋の建設現場を視察しました。

今後も年2回を基本に委員会が開催され、次回は2025年6月にオーストラリアのブリスベンで開催される予定です。

(長大橋技術部総括・耐震・耐風課長代理 坂本佳也)



写真-1 委員会の状況



写真-2 セミナーでの発表状況



写真-3 テクニカルビジット

国内における技術支援活動

Domestic technical supports

2024年4月に発足した技術支援室では、本四高速道路ブリッジエンジニアリング株式会社(以下「HBE」)と協力し、従前より国内の道路管理者等に対し実施してきている受託業務や技術的助言などの技術支援活動を引き続き行っています。技術支援活動としては、前述のほか、ニーズの掘り起こしとして、相談対応のほか、個別訪問やWEB会議、技術展での広報活動も積極的に行っており、これらの今年度の主な活動を紹介します。

1. 受託等業務

(1) 広島県道路公社(安芸灘大橋等)

吊橋ケーブルの点検や維持管理

(2) 長野県中野市(平成橋)

PC斜張橋の補修に関する補助等

(3) 高知県(上古野川橋)

吊橋の修繕工事プロポーザル審査委員会に参画

(4) 中日本高速技術マーケティング(名港トリトン)

鋼斜張橋の塗膜調査(HBE受注)

(5) 川崎市(大師橋)

鋼斜張橋の耐震補強設計に関するコンサルタントへの技術的助言

(6) 兵庫県まちづくり技術センター

地方公共団体管理の鋼斜張橋ケーブルの現地確認を行い、定期的な張力測定を提案(HBE受注)(写真-1)

(7) その他、鋼桁桁橋の床版の調査等を受注。

2. 技術相談対応

(1) 九州地方整備局九州道路メンテナンスセンター

地方公共団体管理のPC斜張橋のケーブル振動対策及び吊橋の主ケーブル等補修方法に関する相談

(2) その他、地震被害を受けた斜張橋を管理する地方公共団体からの技術相談等。

3. 広報活動

ハイウェイテクノフェア等の3つの技術展(東京・大阪)への出展し、技術支援をPRしました。本四高速グループ(以下「本四」)の知名度があまり高くなく、知名度アップを図る必要があることがわかりました。

4. 営業活動

PR用パンフレットを作成し、全地方整備局及び道路メンテナンスセンターや県技術センターを訪問(一部WEB)しPRを実施したほか、県の道路メンテナンス会議に出席し、県内の各道路管理者にPRを行いました。(写真-2) また、複数の道路管理者に対し橋梁用低位置道路照明のPRを実施し、好感触を得ています。

本四ではこれまで、国内の長大橋建設事業に多くの技術者を派遣したり、維持管理に際しての技術的助言を行ってきました。現在でも、道路管理者等から吊橋や斜

張橋等に関する技術協力依頼や相談があり、今後は更にニーズが広がっていくと考えられ、それらに対応できる人材の育成・体制の整備が不可欠であると考えています。

特殊橋梁の整備や維持管理を行う地方公共団体では、技術者不足等のため、国土交通省の道路メンテナンスセンターや、県の技術センター等に協力依頼することも多いと聞いており、本四としては、地方公共団体を直接支援するほかに、これらの団体を支援することで、地域社会への貢献や活動のPRにもつながると考えています。

大きな収益の見込める事業ではありませんが、本四が持つ特殊橋梁の計画・調査・設計・建設・維持管理の知見に加え、高度化した維持管理技術をもって支援することは、地方公共団体との連携構築にも有効だといえます。

(長大橋技術部兼技術支援室 担当部長 二宮仁司)



写真-1 市管理の斜張橋でケーブル張力測定 (HBE)



写真-2 県道路メンテナンス会議でのPR状況



図-1 PR用パンフレット

保有特許一覧

国内特許

2025.1 時点

特許番号	特許名	特許権者
4115472	橋梁構造物における足場の組立方法	本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
4327834	斜張橋のケーブル定着部の防水処理方法およびその装置	本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
4627765	トンネル用換気ガス浄化装置のフィルタ再生方法及び装置	本州四国連絡高速道路(株)
5255516	ワイヤロープの防錆剤圧入方法及び装置	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 東京電設サービス(株)
5539793	打撃工具	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) (株)技術開発研究所
5582883	素地調整装置	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) (株)技術開発研究所
5757657	鋼管杭の防食施工方法	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 日鉄防食(株)
5873785	ボルト・ナットの素地調整工具	本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
5881984	素地調整工具	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) (株)技術開発研究所
5887249	土木構造物補修用ブラスト装置およびそれを用いた土木構造物補修方法	本州四国連絡高速道路(株)
5926078	素地調整装置	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) (株)技術開発研究所
6052737	鋼床版の亀裂検出方法および亀裂検出装置	本州四国連絡高速道路(株) 公立大学法人 滋賀県立大学 国立大学法人 神戸大学
6341897	鋼床版の下面補修方法	本州四国連絡高速道路(株) 学校法人 関西大学
6478948	ワンサイドボルトで縦リブとデッキプレートとを接合した鋼床版構造を備える鋼橋	本州四国連絡高速道路(株) 坂野 昌弘
6671661	塗膜劣化検出方法	本州四国連絡高速道路(株) 国立大学法人 神戸大学

特許番号	特許名	特許権者
6693997	主塔改修工事に用いる移動昇降式足場及び主塔改修工事における移動昇降式足場を用いた構造物の補修施工方法	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) エム・エムブリッジ(株) (株) I H I インフラシステム (株) タカミヤ
6691519	構造物の塗膜消耗量測定方法	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
6718910	ヘッド装置及びブラスト装置	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) エム・エムブリッジ(株) (株) I H I インフラシステム (株) ナカタ・マックコーポレーション
6718426	ケーブルの防食方法	本州四国連絡高速道路(株)
6885888	足場設置方法及び足場設置構造	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) エム・エムブリッジ(株) (株) I H I インフラシステム
6925876	網状物観測装置、及び画像編集装置	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 東京電設サービス(株)
6975212	鋼橋の鋼製閉断面部材の座屈防止構造	本州四国連絡高速道路(株)
7323380	網状構造体の維持管理方法及び網状構造体の維持管理装置	本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 東京電設サービス(株)
7402903	ハンガーロープ防錆処理方法	本州四国連絡高速道路(株) 本四高速道路ブリッジエンジニア(株) 東京電設サービス(株)
7503270	伸縮ブームの接触防止装置	本州四国連絡高速道路(株) 岡田エンジニアリング(株)

■ 国際特許

2025.1 時点

特許番号	特許名	特許権者
US11346011B2 米国	METHOD FOR PREVENTING CORROSION OF CABLE	本州四国連絡高速道路(株)

文 献 紹 介

本州四国連絡橋関連技術文献紹介 (2024.07~2024.12)

題 名	著 者	雑誌名等	巻	号	年月	頁
本州四国連絡橋のメンテナンスの最新動向及び事例	後藤敦	土木施工2022.7 Vol.63 No.7	63	7	202207	4
社会的共通資本としての本四架橋	西村裕紀 前島一陸 遠香尚史 小池淳司	第68回土木計画学研究発表会・秋大会			202311	9
耐震補強に用いる国内最大規格の制震ダンパー性能検証—しまなみ海道(西瀬戸自動車道)多々羅大橋—	下瀬恒太 金田崇男	高速道路と自動車 第67巻 第6号	67	6	202406	4
瀬戸内しまなみ海道開通25周年	本州四国連絡高速道路(株) 企画部経済調査課	高速道路と自動車 第67巻 第6号	67	6	202406	5
本州四国連絡高速道路(株)	本州四国連絡高速道路(株) 経理部 経営計画部 企画部	高速道路と自動車 第67巻 第6号	67	6	202406	4
ハンガーロープ定着部補剛材のひずみ計測によるハンガー張力推定	横井芳輝 綾城威歩生 杉山剛史	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会			202409	3
吊橋ハンガーロープ定着部周辺のひずみ計測による張力推定値と実測値	綾城威歩生 横井芳輝	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会			202409	3
ケーブル外観検査装置の開発	北村耕一 瀬戸口雄介 尾池伸一 河村睦 本郷誠人 後藤稜平	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会			202409	3
吊橋ケーブル送気乾燥システムにおけるIoTを活用した監視システムの開発	楠原栄樹 溝上善昭 米澤篤志 外和也 山本達也	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会			202409	3
主ケーブル外装モニタリングシステムの開発	勝原宙 後藤稜平 大井隆生	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会			202409	3
本州四国連絡橋の斜張橋ケーブル点検における取組	本郷誠人 後藤稜平 北村耕一 瀬戸口雄介 河村睦	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会			202409	3
因島大橋の耐震補強設計	小林弘昌 花井拓 坂本佳也	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会			202409	3
片側施工高力ボルトのバルブスリーブの腐食による軸力変化に係る解析的検討	渡邊裕規 横井芳輝 杉山剛史	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会			202409	3
鋼床版縦桁支承の状態が長大吊橋の構造安全性に及ぼす影響検討	金田泰明 花井拓 坂本佳也	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会			202409	3

題 名	著 者	雑誌名等	巻 号	年月	頁
橋全体系での合理的な耐震補強設計の例	藤井彩佳 寺嶋賢策 前田喜宏	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
既設コンクリート構造物におけるシラン系表面含浸材の施工方法と含水率に関する検討	梶房祥子 二神啓 田村拓登 森川英典	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
異なるASR劣化状態のコンクリートに対するシラン系表面含浸材の性能評価	二神啓 西野豊 森川英典 中西智美 田村拓登 梶房祥子	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
吊橋ハンガーロープ塗替え塗装における素地調整システム(その1)	明石良男 岸徳光 小室雅人 石川雅人 武田浩 西川一基	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
吊橋ハンガーロープ塗替え塗装における素地調整システム(その2)	西川一基 武田浩 岸徳光 小室雅人 明石良男 石川雅人	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
ハイパースペクトル計測による重防食塗装の劣化評価	谷晃徳 阪上隆英 塩澤大輝 小川裕樹 春名進佑 横井芳輝 杉山 剛史	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
赤外分光スペクトル情報の主成分解析による防食塗膜劣化の検知精度向上	春名進佑 阪上隆英 塩澤大輝 小川裕樹 谷晃徳 横井芳輝 杉山 剛史	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
現場条件の厳しい橋梁における防水・舗装一体型床版防水システムの適用	瀧川歩実 木内愛理	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
トラス橋現場継手内面のボルト腐食状況調査	小坂祐輔 河野晴彦 横井芳輝 福富隼人 本郷誠人	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
土木鋼構造分野における非破壊検査技術と維持管理DXとの連携について	田村拓登 宇野津哲哉 西芝貴光 佐々木昇 長澤大次郎	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
Deep learning を用いた画像診断による長大橋の鋼桁外面腐食の検出手法	服部浩太郎 大木奎一 杉山剛史 全邦釘	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
オプティカルフローによる鋼桁外面腐食の位置取得の検討	大木奎一 服部浩太郎 杉山剛史 全邦釘	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
明石海峡大橋の効率化な維持管理に向けたBIM/CIMモデルの構築	人見淳 宮田秀太 徳橋亮治 杉山剛史 河野晴彦 田村拓登	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
BIM/CIMとタブレット端末の連携による長大橋維持管理の効率化・高度化検討	杉山剛史 山口和範 河野晴彦 津田久嗣 細矢征史 金野幸治 高橋健太 森山大輝 溝上善昭 後藤稜平 外和也	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3

題 名	著 者	雑誌名等	巻 号	年月	頁
長大橋維持管理のためのBIM/CIMモデルの構築検討	内野隆太郎 山口和範 杉山剛史 河野晴彦 後藤稜平 外和也 溝上善昭 細矢征史 杉田彩	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3
MR技術を活用した長大橋維持管理用タブレット端末の検討	河野晴彦 杉山剛史 山口和範 内野隆太郎 溝上善昭 後藤稜平 外和也 細矢征史 金野幸治 高橋健太 森山大輝	土木学会全国大会 第79回年次学術講演会		202409	3

※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7年1月1日現在

委員長	竹口昌弘	幹事長	花井拓
委員	有馬敬育	幹事	池田秀繼
	白田幸生		白田幸生
	香川晃巳		大串弘幸
	佐伯成巳		小島晴彦
	長尾幸雄		河野浩之
	西野晋二		小坂佳也
	花井基樹		坂本祐一
	萬城憲二		杉本輝哉
	藤田太夫		田中勇人
	藤山幸彰		玉津智紀
	森山和範		辻井淳至
	森山和弘		西田善昭
	山本和弘		溝上善昭
	山本和茂		山本和茂

本四技報 第143号

発行 令和7年3月27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>



当紙/印刷配合率70%再生紙を使用

