

本四技報

HONSHI TECHNICAL REPORT

Vol.48 No.141 2024.3

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141号 目次

Contents of Honshi Technical Report No.141

【巻頭言】

「交流」と「技術」による社会貢献佐々木政彦… 1
Contribution through communication and technology

【技術論文】

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… 2
Effect of the Condition of Steel Deck Bearing on the Structural Safety of Long-Span Suspension Bridges

片側施工高力ボルトのバルブスリーブの腐食が残存軸力に及ぼす影響
.....横井芳輝・平松直人・杉山剛史… 8
Corrosion Effect of Valve Sleeve on Residual Axial Force of oneside high-strength bolts

温度ギャップ装置の現状と今後の展望..... 後藤稜平・横井芳輝…19
Current status and future prospects of Temperature-Gap equipment

明石海峡大橋における舗装の長寿命化に向けた取組.....武田拓実・斎藤佑太・樋口勇輝…25
An Approach to Prolong the Pavement Life in Akashi-Kaikyo Bridge

【海外報告】

コンゴ民主共和国マタディ橋の現況.....横井芳輝・竹内政彦・大浦義司…31
Current Status of the Matadi Bridge in Democratic Republic of the Congo

【技術ニュース】

IABSE シンポジウムイスタンブール 2023木内愛理…37
IABSE Symposium Istanbul 2023

グレートベルト・リンク開通 25 周年行事及び技術交流綾城威歩生…38
Great Belt Link 25th Anniversary Event and Technical Exchange

第 11 回ニューヨーク市橋梁会議岡村英史…39
11th New York City Bridge Conference

PIARC 第 27 回世界道路会議プラハ大会.....坂本佳也…40
PIARC 27th World Road Congress 2023 in Prague

国際吊構造橋梁管理者協会 アジア地域ワークショップ（神戸）.....池田秀継…41
ICSBOA Asia Regional Workshop in Kobe

アジア・オーストラレーシア道路会議 2023（インドネシア）.....小林弘昌…42
Asia Australasia Road Conference 2023 (Indonesia)

【保有特許】

保有特許一覧.....43
List of patents

【文献紹介】

本州四国連絡橋関連技術文献紹介.....45
Technical articles related to Honshu-Shikoku Bridges

片側施工高カボルトのバルブスリーブの腐食が 残存軸力に及ぼす影響

Corrosion Effect of Valve Sleeve on Residual Axial Force of oneseid high-strength bolts



写真-1 片側施工高カボルトのバルブスリーブの腐食状況

Photo 1 Corrosion condition of valve sleeve of oneseid high-strength bolts



写真-2 超音波によるボルトの残存軸力測定

Photo 2 Ultrasonic measurement of residual axial force of bolts

明石海峡大橋における舗装の長寿命化に向けた取組

An Approach to Prolong the Pavement Life in Akashi-Kaikyo Bridge



写真-3 試験施工の状況（路面切削）

Photo 3 Test pavement (Road Surface Cutting)



写真-4 試験施工の状況（舗設および一次転圧）

Photo 4 Test pavement (Paving & First Compaction)

コンゴ民主共和国マタディ橋の現況

Current Status of the Matadi Bridge in Democratic Republic of Congo



写真-5 マタディ橋の全景
Photo 5 Matadi Bridge

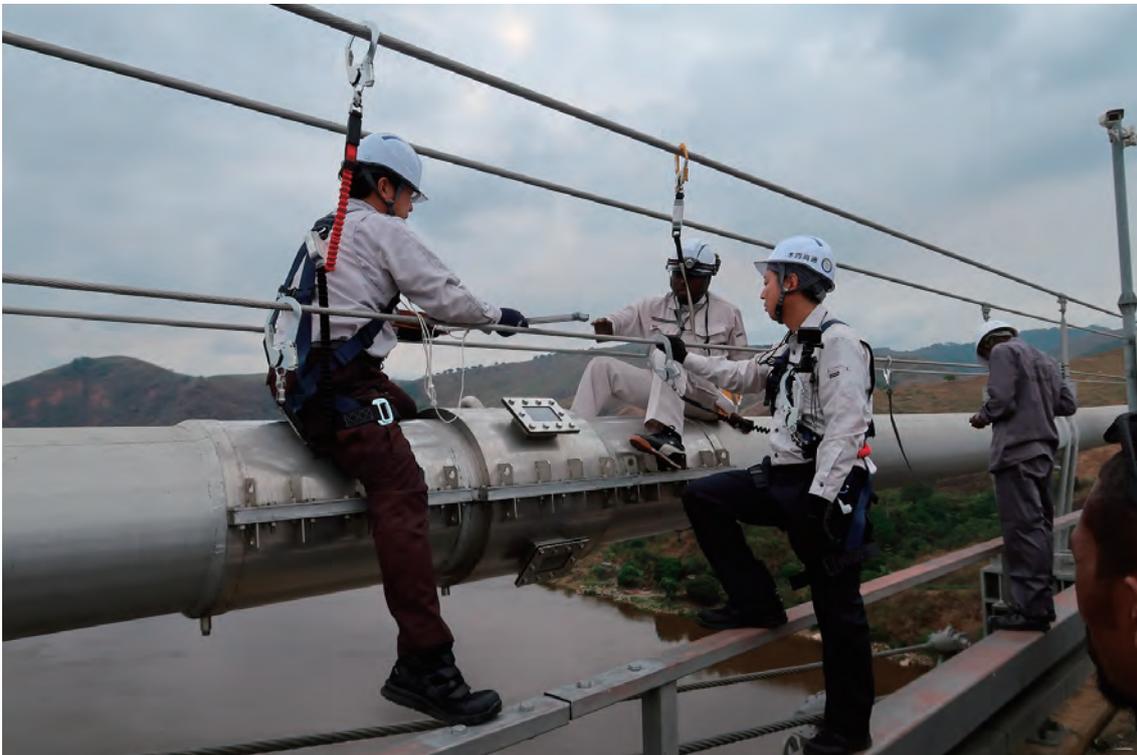


写真-6 ケーブル送気乾燥システムの点検
Photo 6 Inspection of dry air injection system



写真-7 鋼床版の点検

Photo 7 Inspection of steel deck



写真-8 塗膜の調査

Photo 8 Coating investigation

「交流」と「技術」による社会貢献

Contribution through communication and technology

取締役常務執行役員 佐々木 政彦

Masahiko Sasaki

【はじめに】

JB本四高速の経営理念に「私たちは、本州と四国を結ぶ世界に誇る橋を良好に保つことにより、人と物の交流と地域の連携を推進し、経済の発展と生活の向上に寄与します。また、これまで培ってきた橋の建設、管理技術を活用して、広く社会に貢献します。」と記されているように、当社の社会貢献のキーワードは「交流」と「技術」であると考えます。そこで、「交流」と「技術」について、課題も含め思うところを述べたいと思います。

【交流へ貢献と課題】

本四道路を利用した人流、物流は、産業の活性化や生活の質の向上に貢献しています。当社が実施した解析においても、本四道路のストック効果は周辺地域のみならず、全国に及ぶとの結果が得られています。

交流実績を示す代表的な指標である通行台数で見ると、本四道路の通行台数は、全国共通料金導入後増加基調が継続しており、2019年度には過去最高となる年間4,420万台まで拡大しました。その後、新型コロナウイルスの影響により落ち込みましたが、2022年度は2019年度比約98%の4,342万台まで回復しました。2023年度に入っても回復基調は継続し、2023年12月末時点では、2019年度を上回り過去最高を更新する状況で推移しています。これは、地域が本四道路を活かした交流活性化や利用促進に積極的に取り組んで頂いた成果と考えています。

一方、貨物車の交通量は、新型コロナウイルスによる影響期間中も減少することなく安定的に推移しており、本四道路が本州四国間物流の根幹として機能していることの証左と認識しています。

なお、2014年度に導入され2023年度までの措置とされた全国共通料金は、2024年度以降も継続する方針が国において決定されましたが、全国共通料金の導入は本四高速道路単独ではなく、他の全国路線網の高速道路と一体で債務償還をすることにより実現できていることを肝に銘じなければなりません。加えて、中長期的には人口減少による通行台数への影響の顕在化が懸念されます。引き続き地域の関係各位と連携して交流人口増大、利用促進に取り組んでいくことが当社に求められています。

【技術による貢献と課題】

前記の経営理念にも記されていますが、技術による貢献には2つの側面があります。1つは本四道路を適切に保全し交流基盤として使い続けるための技術、もう1つは

本四道路の建設・管理で培われた技術を活かした国内外への貢献です。

本四道路に関しては、2024年、最初に開通した大三島橋の開通から45年、最後に開通した来島海峡大橋の開通から25年を迎えます。国内外には本四道路よりも長期間供用され、今なお現役で活躍する長大橋は数多くありますが、本四道路においてはインフラのライフサイクルの視点から見ると短期間といえる20年間に集中的に整備された単独の管理者が管理する17もの長大橋群が同時に老朽化が進行するという、前例のない状況を迎えることとなります。そのため、主塔、ケーブル、桁などの長大橋の骨格を構成する部材はもちろんですが、付随的な部品等の適切な点検、補修も欠かせません。これら部品等の数は膨大であり、例えば、吊橋の主ケーブルに補剛桁をつり下げる重要な部材であるハンガーロープは約4,000本、鋼床版縦桁を支える支承は約9,800基、点検や補修に欠かせない管理路の総延長は約50kmにも及びます。また、長大橋の大きな変形への追従が求められる伸縮装置は、通常の橋梁に比し大型で機構が複雑な特注品が使用されています。

これまでに蓄積された技術、現場に根ざした経験の継承、発展に加えDXなど新技術の活用により諸課題に対応するとともに、インフラマネジメントの最適化を目指しコスト削減に努めつつ、着実にメンテナンスを行うための安定的な財源確保も課題です。

【おわりに】

私は2023年6月より現職にありますが、瀬戸大橋が開通した1988年に建設省（現国土交通省）入省し最初の勤務地が岡山であり、その後も中四国で勤務する機会が数度あり、本州と四国が実質地続きとなった地域の喜びや交流の拡大を身をもって感じた一方で、様々な課題にも関わらせていただく機会が多くありました。

昨今、社会のあり方を示す上で「サステナビリティ」が1つのキーワードとなっています。サステナブルな社会の実現に本四高速が貢献していくためには、本四高速自体がサステナブルでなければなりません。これから直面するであろう様々な難題にも、これまで培ってきた技術力とチャレンジ精神をもって克服し、国民の貴重な資産である長大橋群を健全な状態に保つことで末永くご利用頂き、地域のみならず全国の活性化に貢献することが当社に課せられた使命と考えています。

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

Effect of the Condition of Steel Deck Bearing
on the Structural Safety of Long-Span Suspension Bridges

金田 泰明 Yasuaki Kaneda

長大橋・技術部
総括・耐震・耐風課

花井 拓 Taku Hanai

長大橋・技術部
総括・耐震・耐風課長

坂本 佳也 Yoshiya Sakamoto

長大橋・技術部
総括・耐震・耐風課長代理

概要

道路橋は法令に従い、全部材に対して5年に1回の頻度で、近接目視を基本とする定期点検を実施しているが、全部材の近接目視には必要な人的負担や費用的負担が大きいためという課題がある。特に同一部材を多数有し、近接目視が容易でない部材が複数存在する吊橋形式の橋梁は、その課題による影響が顕著であり最適な点検が求められている。

本論では、吊橋形式の橋梁に多数配置されている鋼床版縦桁支承に着目し、将来の点検省力化を念頭に、鋼床版縦桁支承が腐食等の原因により固着化した場合における、橋の構造安全性への影響を把握するため解析的に検討を実施した。検討の結果、鋼床版縦桁支承のみ耐力を超過するものの、その他の部材では耐力以下に留まっており、固着化による橋の構造安全性に及ぼす影響は小さいことを確認した。

In accordance with laws and regulations, periodic inspections are conducted once every five years for all members of road bridges, based on close visual inspection. However, the labor and cost burdens required for close visual inspection of all members are significant. In particular, cable-supported bridges that have many similar members and many members which are hard to be inspected in close proximity require optimal inspections.

In this paper, steel deck bearings, which are installed in large numbers in suspension bridges are selected as study targets, and an analytical study to understand the effect on the structural safety of bridges when the steel deck bearings become unmovable due to corrosion or other causes are conducted, with a view to reducing the labor required for future inspection of the steel deck bearings. As a result, it was confirmed that only the steel deck bearings yield, while other members remained elastic range, and that the effect of the unmovable bearings on the structural safety of the bridge was small.

1. はじめに

平成 26 年より道路の老朽化対策として、法令に従いトンネルや道路橋などの道路構造物を対象に 5 年に 1 回の頻度で、近接目視を基本とする定期点検が行われている¹⁾。その中でも道路橋の点検においては、全部材を一律に近接目視するために必要な、人的負担や費用的負担が大きいためという課題がある。特に、本州四国連絡橋の吊橋形式の橋梁については、ハンガーロープや鋼床版縦桁支承のように同一部材を多数有することや、海峡部に存在する巨大構造物という特性上近接目視が容易でない部材が複数存在することなどの理由から、その課題による影響が顕著であり、その点検最適化の実現が求めら

れている。

吊橋形式の橋梁を構成する部材のうち、鋼床版縦桁支承（以下「縦桁支承」という。）は、鋼床版縦桁と補剛トラスを接続する部材であり（図-1）、本州四国連絡橋の吊橋等で約 1 万基設置されている。その中でも最も古く供用後 40 年が経過している因島大橋では、1,200 基の縦桁支承が設置されており、これら縦桁支承は、腐食やテフロン板の脱落などが生じ、その維持管理が課題となっている。加えて、縦桁支承の点検では、点検管理路上から近接目視が可能ではないため、桁外面作業車等の時間と費用を要する近接手段を用いて点検を実施している状況である。

ここで、縦桁支承に求められる機能としては、「鋼床版縦桁からの荷重を補剛トラスに伝達する機能（荷重伝

達機能)」と「鋼床版の伸縮や回転に追随し、鋼床版と補剛トラスの相対的な変位を吸収する機能（変位追随機能）」がある（図-2）。橋に設置されている複数の縦桁支承が各々求められる機能を発揮することにより、橋全体としての所要の機能を発揮できることとなっている。一方で、全ての縦桁支承が健全でないと、所要の機能が発揮できないかは不明確である。そこで、一部の縦桁支承が、その機能の一部を失ったとしても、縦桁支承全体で失われた機能を代替することができるか、あるいは、他の部材によって機能を代替できるかを確認することとした。

具体的には、縦桁支承のうち可動支承が、腐食等の原因によって固着化することで、その変位追随機能（水平追随機能）が喪失した状態を想定し、解析において固定支承として扱うことで、周辺部材に及ぼす影響と橋の構造安全性に及ぼす影響を評価した。ここで橋の構造安全性とは、落橋に対する安全性を確保するとともに、緊急車両等が通行可能な状態を想定している。

2. 解析概要

2.1 縦桁支承の配置と鋼床版の構成

検討は、因島大橋を対象に実施した。因島大橋は、1支線に8基の縦桁支承があり、橋軸方向には5径間を標準とした鋼床版（一部で4径間）で構成されており（図-3、4）、全体で計 1,200 基の縦桁支承が存在する。



図-1 鋼床版縦桁支承
Fig.1 Steel deck bearing

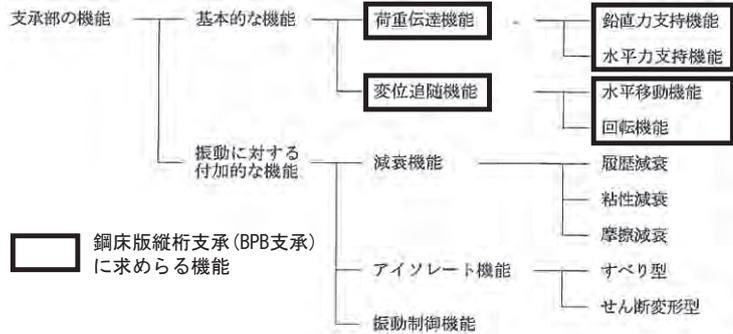


図-2 支承部に求められる機能²⁾
Fig.2 Functions required for the bearings

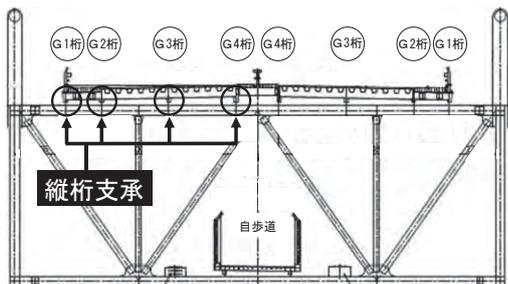


図-3 補剛トラスの断面図
Fig.3 Cross sectional of stiffened truss

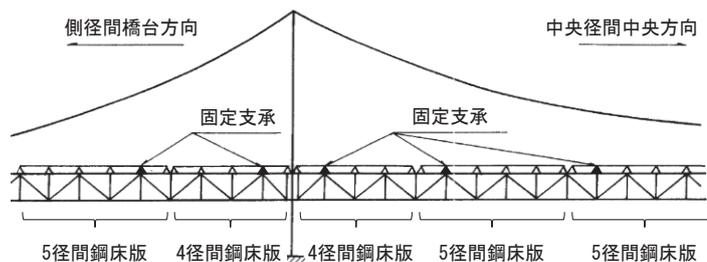


図-4 鋼床版縦桁支承の配置
Fig.4 Location of steel deck bearing

2.2 解析モデルと着目部材

解析モデルは、橋全体の構造安全性に及ぼす影響を確認するため、全橋モデル（3次元立体骨組みモデル）を使用した（図-5）。なお、この解析モデルは、令和2年度に実施した耐震補強設計の結果³⁾を反映させている。また、本解析では、縦桁支承を含む周辺部材への影響に着目するため、縦桁支承は個々に、縦桁は桁ごとにモデル化した。加えて、鋼床版は橋軸直角方向の剛性を考慮できるように線形トラス要素でモデル化した。

解析で着目する部材を表-1に示す。応答値の整理や比較は、縦桁支承と縦桁（線形梁要素）では断面力、補剛トラス各部材（非線形ファイバー要素）ではひずみの最大値、主ケーブルとハンガーロープ（線形ケーブル要素）では張力で行った。

2.3 解析ケース

縦桁支承の状態が橋の構造安全性に及ぼす影響を定量的に評価できるように、各着目部材に対して、縦桁支承の固着化範囲の違いによる影響（7ケース）と、作用の違いによる影響（4ケース）に着目し、それぞれを組み合わせた計28ケースの解析を行った。

縦桁支承の固着化範囲の違いでは、(1)固着化なしのケースを含めた、7ケースを設定した（表-2、図-6）。固着化したケースは、おおまかな傾向を把握するため極端な状態を設定し、(2)全ての縦桁支承が固着化したケース、(3)側径間の全てが固着化したケース、(4)中央径間の全てが固着化したケース、に加えて(2)~(4)の上

り線のみが固着化したケースとした。

考慮する作用の違いでは、それぞれ作用方向の異なる4ケースを設定した(表-3)。なお、活荷重、温度差の影響、風荷重は静的に作用させ、地震の影響は動的に作用させた。

活荷重は、H29 道示⁴⁾に規定されるL荷重(B活荷重)とした。活荷重分布は、縦桁支承に厳しい条件となるよう、上り線側に偏載した。

温度差の影響は、H29 道示⁴⁾の考え方を参考にし、着目部材である縦桁支承部に相対変位が生じるように、鋼床版と補剛トラス間の温度差として、鋼床版に+15度を作用させた。

風荷重は、建設時に吊構造部、ケーブル部、塔に载荷している⁵⁾ことを考慮し、建設時と同様の荷重強度と载荷方向で载荷させた。ただし、建設時は補剛トラスを

1本の梁要素でモデル化し風荷重を载荷しているため、本検討では主構上弦材と主構下弦材に1/2ずつ载荷した。

地震の影響は、令和2年度に実施した耐震補強設計で対象とした地震動のうち、耐震補強量の決定に支配的であった想定芸予地震(2波)と東南海・南海地震(1波)の3波を、それぞれ3方向同時入力で作用させた。

3. 解析結果(作用の違いによる影響)

3.1 活荷重による解析結果

活荷重を作用させたときの解析結果の例を図-7,8に示す。橋体の全体的な応答の傾向として、活荷重により補剛トラス全体が鉛直方向にたわむことで、たわみ角が最も大きくなる中央径間中央付近の部材の応答が卓越し

表-1 解析で着目する部材と応答値

Table 1 Members and responses focused on in the analysis

着目部材		着目応答値	
縦桁支承		鉛直正反力(圧縮力)	
		鉛直負反力(引張力)	
		橋軸方向水平力	
		橋軸直角方向水平力	
周辺部材	鋼床版	縦桁	軸力
			鉛直曲げモーメント
	主構トラス	上弦材	ひずみ
		下弦材	
		斜材	
		垂直材	
	構トラス	上弦材	ひずみ
		下弦材	
		斜材	
		垂直材	
その他	主塔	張力	
	主ケーブル		
	ハンガーロープ		

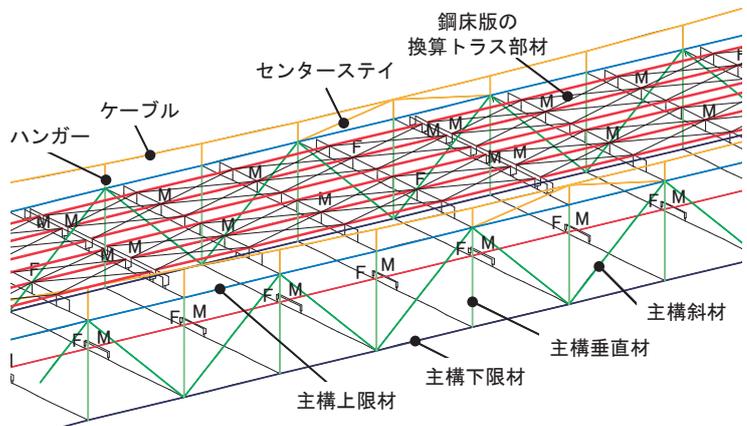


図-5 解析モデル(中央径間中央部)
Fig.5 Analysis Model (center of center span)

表-2 想定する固着化の範囲(7ケース)

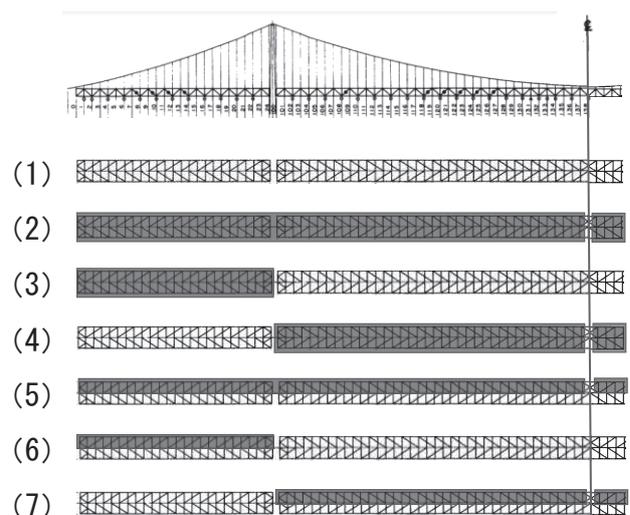
Table 2 Assumed extent of fixation (7case)

	固着化の対象支承	支承の状態
1	固着化なし	すべて健全
2	側径間および中央径間(上下線)	可動支承を固定支承として考慮
3	側径間(上下線)	
4	中央径間(上下線)	
5	側径間および中央径間(上り線のみ)	
6	側径間(上り線のみ)	
7	中央径間(上り線のみ)	

表-3 考慮する作用と方向(4ケース)

Table 3 Assumed Action and direction (4case)

解析の種類	作用の種類	作用方向
静的解析	活荷重	鉛直方向
	温度差の影響	橋軸方向
	風荷重	橋軸直角方向
動的解析	地震の影響	3方向同時入力



■ 固着化を想定する範囲

図-6 想定する固着化の範囲図
Fig.6 Assumed extent of fixation

た。この傾向は、固着化の有無に関わらずみられた。

図-7 に主構上弦材の応答を示す。固着化により全長にわたって応答が低減した。これは、補剛トラス全体に作用する鉛直曲げに対して、固着化によって鋼床版が抵抗するようになり、上弦材側の抵抗部材が増え、中立軸が上弦材側に上昇するためと考えられる。よって、図-8 に示のように、主構下弦材では応答が増加した。

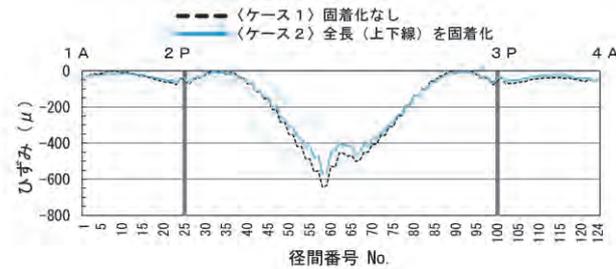


図-7 主構上弦材のひずみ (活荷重)
Fig.7 Strain in upper chord of main truss (live load)

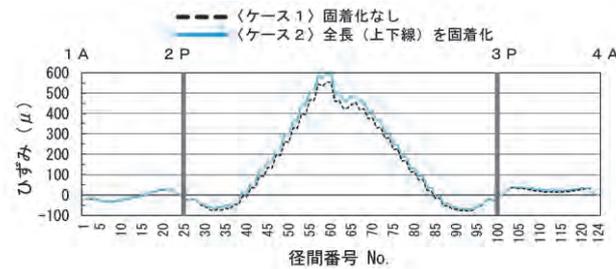


図-8 主構下弦材のひずみ (活荷重)
Fig.8 Strain in lower chord of main truss (live load)

3.2 温度の影響による解析結果

温度の影響を作用させたときの解析結果の例を図-9 に示す。縦桁支承が固着化したときの全体的な応答の傾向として、温度差の影響により鋼床版が伸びることで、補剛トラスの上弦材側が引張側に移行した。

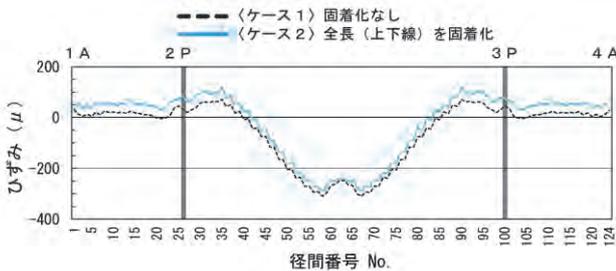


図-9 主構上弦材のひずみ (温度の影響)
Fig.9 Strain in upper chord of main truss (effect of temperature change)

3.3 風荷重による解析結果

風荷重を作用させたときの解析結果の例を図-10, 11 に示す。橋体の全体的な応答の傾向として、風荷重により補剛トラス全体が橋軸直角方向にたわむことで、側径

間に比べ大きな変形が生じる中央径間の部材の応答が卓越した。この傾向は、固着化の有無に関わらずみられた。

風荷重を作用させたときの、縦桁支承の固着化による影響の特徴を図-10, 11 に示す。上り線 (風下側) のみを固着化したとき (ケース 5) に、下り線 (風上側) の主構上弦材は応答が増加し、上り線 (風下側) の主構上弦材は応答が減少した。これは、補剛トラス全体に作用する橋軸直角方向の曲げに対して、上り線の橋軸方向の縦桁支承の固着化によって、上り線側の鋼床版縦桁が抵抗するようになり、上り線側のみ抵抗部材が増え、中立軸が上り線側に移行するためと考えられる。

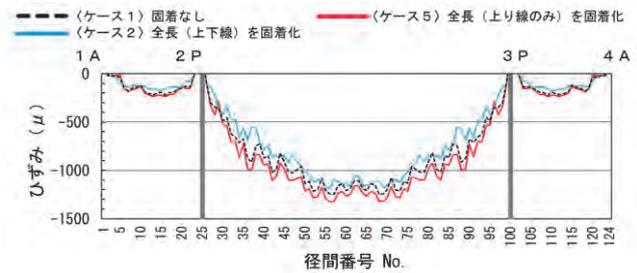


図-10 主構上弦材のひずみ (下り線 : 風上側)
Fig.10 Strain in upper chord of main truss (windward side)

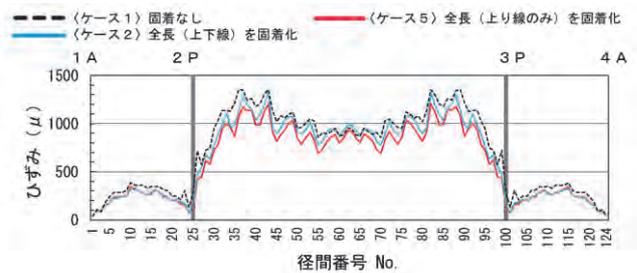


図-11 主構上弦材のひずみ (上り線 : 風下側)
Fig.11 Strain in upper chord of main truss (leeward side)

3.4 地震の影響による動的解析結果

地震の影響を作用させたときの解析結果の例を図-12, 13 に示す。地震の影響を作用させたときの、縦桁支承の固着化による影響の特徴は、活荷重時のときと類似の傾向を示した。つまり、補剛トラスが鉛直方向に変形するときは、固着化により鋼床版縦桁が抵抗するようになり、中立軸が上弦材側に上昇することで、上弦材側の部材の応答は減少し、下弦材側の部材の応答は増加する。

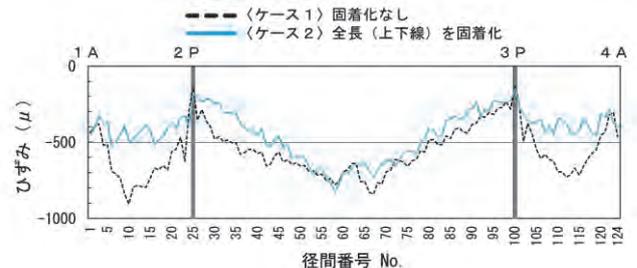


図-12 主構上弦材のひずみ (圧縮) (地震の影響)
Fig.12 Strain in upper chord of main truss (Compressive) (effect of earthquakes)

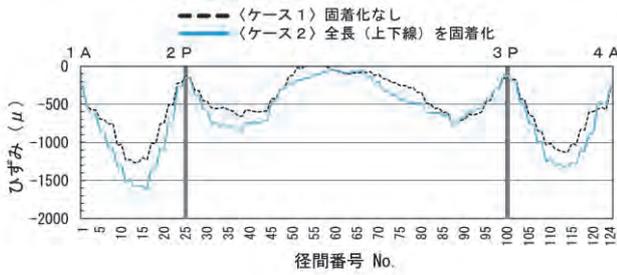


図-13 主構下弦材のひずみ (圧縮) (地震の影響)
Fig.13 Strain in lower chord of main truss (Compressive)
(effect of earthquakes)

4. 解析結果 (固着範囲の違いによる影響)

4.1 側径間の固着と中央径間の固着の違いによる影響

側径間の固着化に着目した場合、側径間の縦桁支承の固着化が、中央径間の部材の応答に与える影響はほとんどなかった (図-14)。このため、中央径間の応答に着目した場合、固着化なしのとき (ケース 1) と、側径間のみ固着化させたとき (ケース 3) では、応答に優位な差はみられなかった。これは、側径間の応答に着目した場合、中央径間の固着化においても、同様である。この傾向は、作用の種類や部材に関わらず、同様であった。

ケース 1~4 を比較した結果を図-15 に示す。上述の傾向から、側径間の固着化、中央径間の固着化、全長の固着化の応答の傾向を比較したとき、ほとんどの作用ケースにおいて、全長を固着化したとき (ケース 2) が最も大きい応答を示す結果となった。

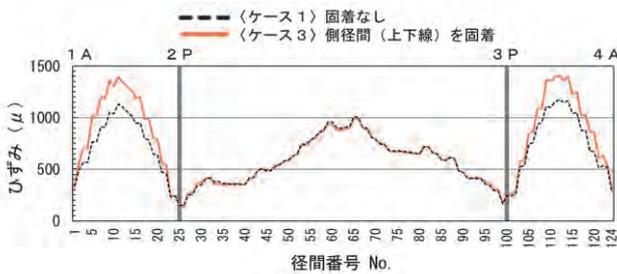


図-14 主構下弦材のひずみ (引張) (地震の影響)
Fig.14 Strain in lower chord of main truss (tensile)
(effect of earthquakes)

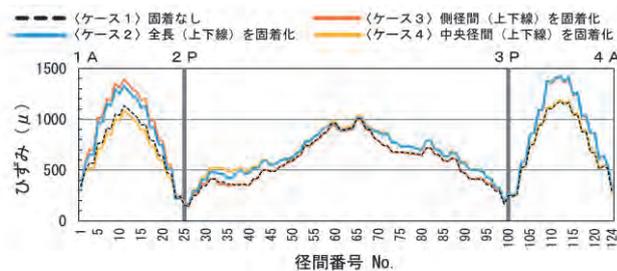


図-15 主構下弦材のひずみ (引張) (地震の影響)
Fig.15 Strain in lower chord of main truss (tensile)
(effect of earthquakes)

4.2 上下線の固着と上り線のみ固着の違いによる影響

上下線を固着化させたとき (ケース 2) と、上り線のみを固着化させたとき (ケース 5) の応答の、固着が無い状態 (ケース 1) の応答に対する増減を比較すると、固着化させた側である上り線側の部材では同程度であるが、反対側である下り線側の部材ではケース 5 の時に増減が小さかった (図-16, 17)。

ただし、活荷重時の鋼床版縦桁、風荷重時の主構上弦材と主構下弦材、地震の影響時の縦桁支承と鋼床版縦桁においては、上述の傾向はみられず、ケース 5 の方が大きな増加又は減少、あるいはケース 2 とケース 5 で応答の傾向が異なった。

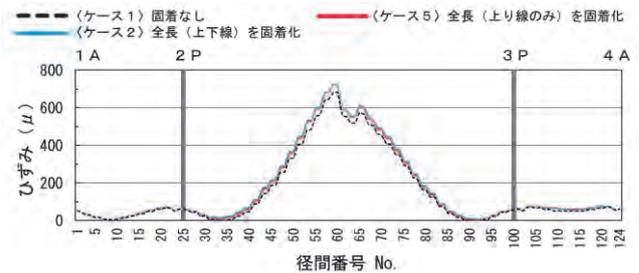


図-16 主構下弦材のひずみ (活荷重 : 上り線)
Fig.16 Strain in lower chord of main truss
(live load : north-bound lane)

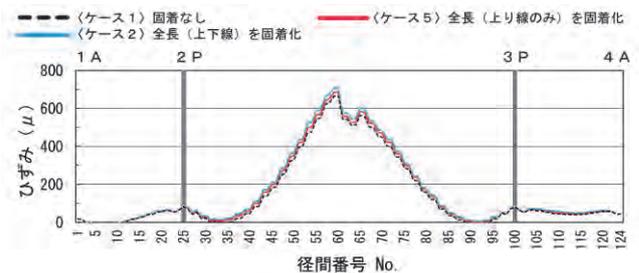


図-17 主構下弦材のひずみ (活荷重 : 下り線)
Fig.17 Strain in lower chord of main truss
(live load : south-bound lane)

5. 解析結果 (橋の構造安全性に与える影響)

5.1 耐力を超過する部材

縦桁支承の固着化による部材の応答への影響と耐力との関係を以下に示す。活荷重と温度の影響では、全ての部材において耐力の超過はなかった。一方で、風荷重と地震の影響では、一部の縦桁支承において、鉛直負反力と橋軸直角方向水平力で耐力を超過した。例として、耐力が超過した縦桁支承の数が比較的多いケース 2 における結果では、縦桁支承計 1,200 基に対して、風荷重においては、鉛直負反力では 54 基、橋軸直角方向水平力では 132 基が、地震の影響において、鉛直負反力では 41 基、橋軸直角方向水平力では 30 基が耐力を超過した。

5.2 固着化に対する応答感度の高い部材

縦桁支承の固着化によって、応答の増減程度が比較的大きい部材、即ち固着化に対する感度が高い部材は、全ての作用ケースにおいて、縦桁支承と鋼床版縦桁であった。これは、固着化なしの状態での応答が、比較的小さい部材であった縦桁支承と鋼床版縦桁が、縦桁支承の固着化によって、抵抗するようになるためだと考えられる。

5.3 補剛トラスの部材の応答

補剛トラスを構成する部材のうち、耐力に近い値であった主構上弦材又は下弦材について、各作用ケースの応答を図-18, 19, 20, 21 に示す。建設時の設計において支配的な作用であった風荷重や地震の影響では、固着化なしの状態と比較的大きな応答が生じており、これに加えて固着化による応答の増加はあるものの、補剛トラスの全ての部材で耐力の超過はなかった。また、活荷重と温度の影響では、上述の作用と比較して、固着化なしの状態での応答が小さいため、補剛トラスの全ての部材で耐力に対して余裕のある応答となった。

5.4 その他の部材の応答

縦桁支承の固着化による主塔、主ケーブル、ハンガーロープの応答の変化は、優位な差はみられなかった。また、耐力に対しては余裕のある応答であった。

6. まとめ

縦桁支承の固着化が橋の構造安全性に及ぼす影響を把握するため、縦桁支承の支持条件を可動から固定に変更し、主要な作用ケース（活荷重、温度差の影響、風荷重、

地震荷重）において、橋を構成する各部材の応答値を解析的に確認した。

その結果、活荷重と温度差の影響については、縦桁支承が固着化しても、耐力を超過する部材はなく、橋の構造安全性に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方で、風荷重と地震の影響については、一部の縦桁支承（鉛直負反力、橋軸直角方向水平力）で耐力を超過するため、橋の構造安全性に及ぼす影響は否定できない。しかしながら、一般に複数配置される縦桁支承が、同時に破壊する可能性は低いと想定されることから、橋の構造安全性が致命的になる可能性は低いと考えられる。

7. おわりに

縦桁支承の状態として腐食等の原因によって、可動支承が固着化したことによる橋の構造安全性への影響を解析的に検討した結果、橋の構造安全性に及ぼす影響が小さい又は致命的になる可能性が低いことが明らかとなった。今後は、縦桁支承の固着化による疲労耐久性への影響を検討するとともに、橋の性能に及ぼす縦桁支承の条件を明らかにし、長大橋梁に多数配置される縦桁支承の最適な点検を目指していく予定である。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路橋定期点検要領，2019.2
- 2) (社)日本道路協会：道路橋支承便覧，2004.4
- 3) 金田崇男，西谷雅弘，金田泰明：因島大橋の耐震設計，本四技報 Vol48 No.140，2023.6
- 4) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説共通編，2017.11
- 5) 本州四国連絡公団：因島大橋工事誌，1985.9

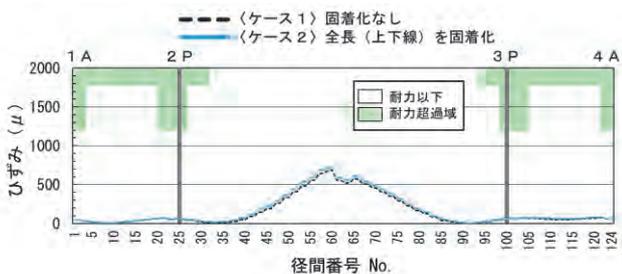


図-18 主構下弦材のひずみ (活荷重)
Fig.18 Strain in lower chord of main truss (live load)

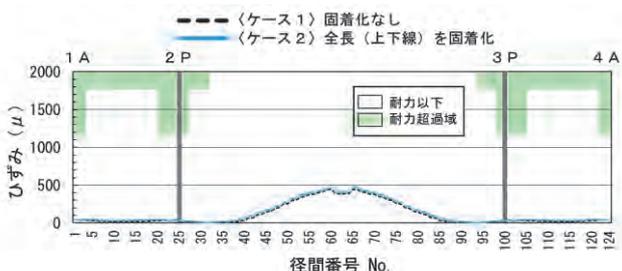


図-19 主構下弦材のひずみ (温度の影響)
Fig.19 Strain in lower chord of main truss
(effect of temperature change)



図-20 主構上弦材のひずみ (風荷重)
Fig.20 Strain in upper chord of main truss (wind load)

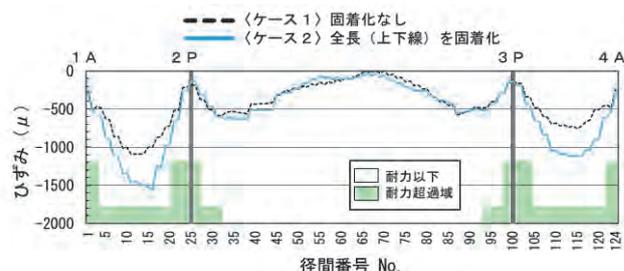


図-21 主構下弦材のひずみ (圧縮) (地震の影響)
Fig.21 Strain in lower chord of main truss (Compressive)
(effect of earthquakes)

片側施工高力ボルトのバルブスリーブの腐食が 残存軸力に及ぼす影響

Corrosion Effect of Valve Sleeve on Residual Axial Force of onside high-strength bolts

横井 芳輝 Yoshiteru Yokoi

長大橋・技術部
技術革新・アセットマネジメント課長代理
(兼) 保全部橋梁保全課長代理

平松 直人 Naoto Hiramatsu

本四高速道路ブリッジエンジニア(株)
技術事業本部 診断部
(兼) コンサルティング部
(前) 長大橋・技術部
技術革新・アセットマネジメント課

杉山 剛史 Takeshi Sugiyama

長大橋・技術部
技術革新・アセットマネジメント課長
(兼) DX推進室

概要

耐震補強工事において、局部座屈強度向上を目的に補剛材を箱型断面部材に片側施工高力ボルトにて接合した箇所において箱断面内部のバルブスリーブの腐食が確認された。バルブスリーブの腐食によりボルト軸力の低下が懸念されたため、腐食模擬試験及びFEM解析によりバルブスリーブの腐食が残存軸力に及ぼす影響について検討した。また、腐食促進試験によりバルブスリーブの耐食性を確認するとともに、実橋において超音波軸力測定を行った。これらの結果、バルブスリーブが腐食により減肉することでその程度に応じて残存軸力が低下することが分かった。一方で、実橋におけるボルト軸力計測により現時点においては軸力に影響のある腐食までは至っていないことを確認した。

Corrosion was identified in valve sleeves that connect stiffeners to box members to improve local buckling strength in seismic retrofit work. Due to a concern about the bolt axial force reduction according to the corrosion, a corrosion simulation test and FE analysis were performed to investigate the effect. In addition, the corrosion resistance of valve sleeves was confirmed by the corrosion acceleration test, and axial forces were measured by ultrasonic waves on the bridge site. As a result, it was found that the residual axial force decreased according to the degree of corrosion on the valve sleeve. On the other hand, the axial force of the bolts on the on-site bridge was confirmed to have sufficient axial force. On the other hand, it was confirmed that the current corrosion is not in severe condition to affect the bolt axial force.

1. はじめに

既設鋼橋の閉断面部材の補修・補強において、構造上や現場条件等の制約から片側施工高力ボルトが採用されることがある¹⁾。番の州高架橋トラス部(3径間連続トラス橋)の耐震補強工事において、薄肉鋼板で構成された主横トラス下弦材(閉断面部材)で局部座屈強度を向上させることを目的に補剛材を取り付けている。補剛材の接合には片面から施工可能な片側施工高力ボルトが使用されている。この部材の大部分は外気の流入がない密閉部となっているが、既設の現場継手部周辺はボルト施工用のハンドホールや板の突合せ部のすき間等により密閉にならない部位(非密閉部)も存在する(写真-1)。本橋の耐震補強工事の完成図によれば片側施工高力ボルトは計6,014本使用されており、うち密閉部が5,796本、非密閉部が218本であった。耐震補強工事完了から約4年

後の定期点検時にハンドホールを開放し部材内部を確認したところ、この非密閉部において片側施工高力ボルトのバルブスリーブに腐食が確認された(写真-2)。原因として、現場継手の板の突合せ部のすき間からの雨水浸入が疑われたため、現在はシール材により防水処理を行っている。

片側施工高力ボルトは、ボルト締付け時に塑性変形したバルブスリーブとナット間のボルト軸部を引き延ばすことで軸力を導入するものである。このため、バルブスリーブが腐食することでボルト軸力の反力を受け持つ抵抗断面が減少し、ボルト軸力が低下することが懸念された。高力ボルトのナット部や頭部の腐食減肉による軸力低下量を評価する試みに関する既往研究はある^{2) 3)}ものの、片側施工高力ボルトのバルブスリーブを対象として検討された事例は見当たらない。

このため、バルブスリーブの腐食が残存軸力に及ぼす

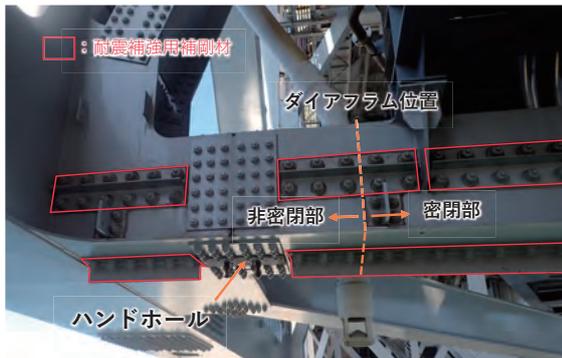


写真-1 耐震補強部材の配置状況

Photo 1 Installation of seismic reinforcement members



写真-2 バルブスリーブの腐食状況

Photo 2 Corrosion condition of valve sleeve

影響を確認するため、人工的に切削して腐食を模擬した腐食模擬試験を行うとともに、FEM解析によりバルブスリーブの腐食減肉に伴う軸力変化及びその低下メカニズムについて検討した。また、腐食促進試験によりバルブスリーブの耐食性を確認するとともに、バルブスリーブに腐食が確認されている現地のボルトの軸力を測定して現状の残存軸力について評価した。

2. 腐食模擬試験

2.1 供試体概要

供試体に用いた締付け鋼板（SS400）の板厚と孔径、片側施工高力ボルトは実橋の条件と統一した。鋼板は既設側鋼材（母材）150mm×90mm×14mm（ボルト孔φ26.0mm）と新設側鋼材（補剛材）150mm×90mm×12mm（ボルト孔φ26.5mm）の2枚とし、これらを重ね合わせたうえで片側施工高力ボルトMUTF24-30により締付けて接合した。なお、接合面の表面処理はコバ面を除いて2種ケレンとし、防せいのため鋼板全面に無機ジンクリッチペイント（35μm）を塗布した。片側施工高力ボルトは専用の電動レンチを用いて締付けた。締付け後の供試体を写真-3に示す。ボルト締付けは、ピンテールが破断するまで締付けて軸力を導入した。なお、実験においてはボルトにひずみゲージを埋め込む作業上、孔加工による断面欠損やナットとワッシャー間の潤滑油がとれたことにより導入ボルト軸力は169.9kN（初期軸力，全平



写真-3 供試体

Photo 3 Example of specimen

均）となり、製品の設計ボルト軸力177kN以下となった。なお、初期軸力は締付け完了から3秒後時点の軸力とした⁴⁾。

2.2 軸力の測定方法

軸力の測定は埋め込み式ひずみゲージによる測定とした。片側施工高力ボルトのコアピンの先端からひずみゲージを埋め込み、測定したひずみから軸力を換算する方法である。この方法は、加工の手間はあるものの、ボルト軸力計測で多くの実績があり、片側施工高力ボルトにも使用された実績がある⁵⁾。ひずみゲージの埋め込み位置はコアピン先端部から36mmの位置とした。

2.3 リラクセーション

高力ボルトは締付け後にリラクセーションによる軸力の低下が生じる。今回の試験においては、リラクセーションによる影響を無視できる状態とするため、供試体の締付けの後もひずみを計測を継続し、リラクセーションにより軸力低下が落ち着き、軸力が安定したことを確認したうえで切削試験を行うこととした。なお、リラクセーションは締付け完了後1週間程度で安定したことを確認し、実際には締付け後から1か月後に切削試験を行った。

2.4 バルブスリーブの切削方法

切削は実橋でも腐食が顕著となったバルブスリーブを切削することとし、ディスクグラインダーにより厚さ方向への切削と直径方向への切削の2パターン実施した（図-1）。切削は軸力を確認しながら実施し、残存軸力90%、70%、50%を目標として切削した。

図-2に一例として、厚さ方向への切削作業に伴うボルト軸力の変化を示す。切削作業に伴い、軸力が低下している様子が確認できる。なお、切削後のリラクセーションは見られなかった。

2.5 計測結果

腐食模擬試験での各パターンの人工減肉量と残存軸力の関係について図-3に厚さ方向、図-4に直径方向の切削パターンの結果を示す。なお、直径方向を切削する

場合の切削後の直径は、母材と接している位置のバルブスリーブの直径とした。これらから、いずれのパターンにおいても減肉量に比例して残存軸力が低下していく傾向が得られた。また、直径方向の切削パターンでは1mm程度の減肉量までは軸力の低下がわずかであると推察される結果となった。腐食により厚さ方向と直径方向が一樣に減肉すると仮定すれば、厚さ方向の減肉量にのみ着目すればよいとも考えられる。実験値にばらつきはあるものの、腐食による減肉量と軸力低下率についておおむね傾向は得られており、腐食による減肉量から軸力残存率を推定できると考えられる。

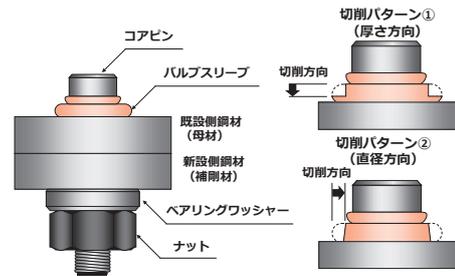


図-1 バルブスリーブの切削パターン
Fig.1 Cutting pattern of valve sleeve

3. FEM解析

3.1 解析

ここでは、FEM解析によりバルブスリーブの腐食減肉に伴う片側施工高力ボルトの残存軸力低下メカニズムについて検討した。

3.2 解析モデル

解析モデルは、2枚の鋼板を片側施工高力ボルト（ボルトMUTF24-30）で締付けた前述の実験供試体を対象とした。解析モデルで採用した寸法を図-5に示す。各種寸法は実験供試体の寸法を設定し、ボルト締付け後のバルブスリーブの形状は、実験供試体の計測寸法及びメーカーヒアリング結果を参考に設定した。解析プログラムはSimcenter Nastran version 2019.0030 SOL402を用いた。図-6に解析モデルを示す。モデル化は、ボルトのコアピン、バルブスリーブ、ベアリングワッシャーと母材（ $t=14\text{mm}$ ）、補剛材（ $t=12\text{mm}$ ）とし、全てをコアピン中央を中心軸とする軸対称要素によりモデル化した。メッシュサイズは、発生する応力度が比較的大きく形状が複雑となる範囲は0.5mmメッシュ、バルブスリーブや母材接触面付近は更に細かく0.25mmメッシュとし、その他は1.5mmメッシュを基本として作成した。また、それぞれの部材の境界（接触面）及び载荷により接触が想定される範囲には、接触条件（コンタクト条件、摩擦係数0.2）を設定した。また、事前に行った線形解析によりコアピン上部、バルブスリーブ、母材（ $t=14\text{mm}$ ）には、降伏点を超える応力が発生する範囲を確認しており、この範囲には非線形特性（弾塑性材料）を設定した。非線形特性は、図-7に示すバイリニア型の応力～ひずみ関係とし、材料特性の設定値を表-1に示す。

ボルトへの軸力導入は、ベアリングワッシャーの下面全面を鉛直方向に固定としたうえで、コアピン下面に強制変位を与えることによりボルト軸力を導入した。なお、コアピン下面には鉛直方向の変位が同調するように中心節点を主節点とする剛体要素を設けた。また、ボルト軸力は実験供試体の軸力を参考に160kNとした。これは前述のとおり実橋の設計ボルト軸力以下であるものの、本

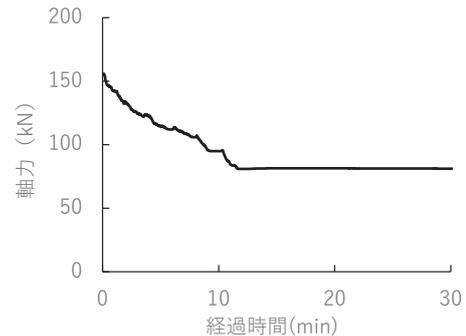


図-2 人工切削作業時の軸力変化
Fig.2 Change in axial force during artificial cutting

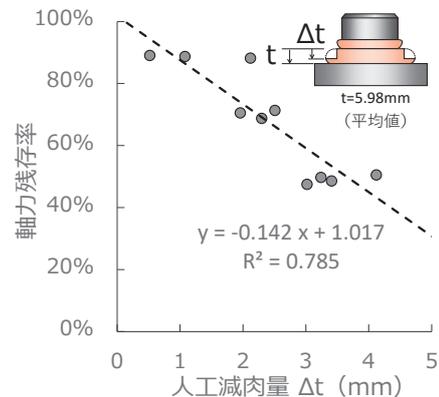


図-3 減肉量（厚さ）と残存軸力
Fig.3 Thickness reduction and residual axial force

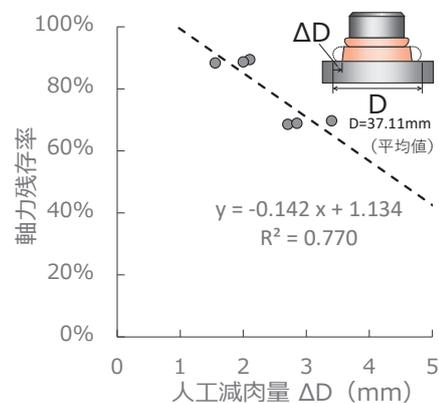
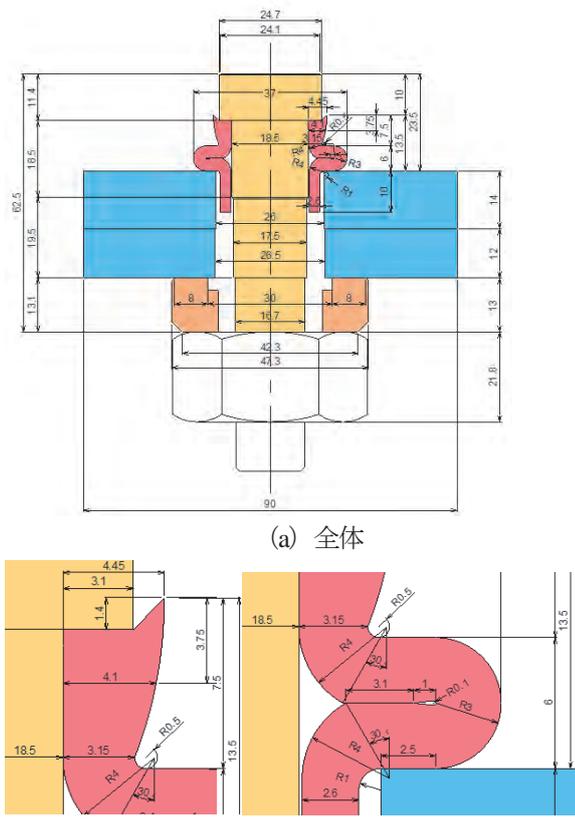


図-4 減肉量（直径）と残存軸力
Fig.4 Diameter reduction and residual axial force



(a) 全体
(b) バルブスリーブ部拡大
図-5 解析モデル寸法
Fig.5 Size of analysis model

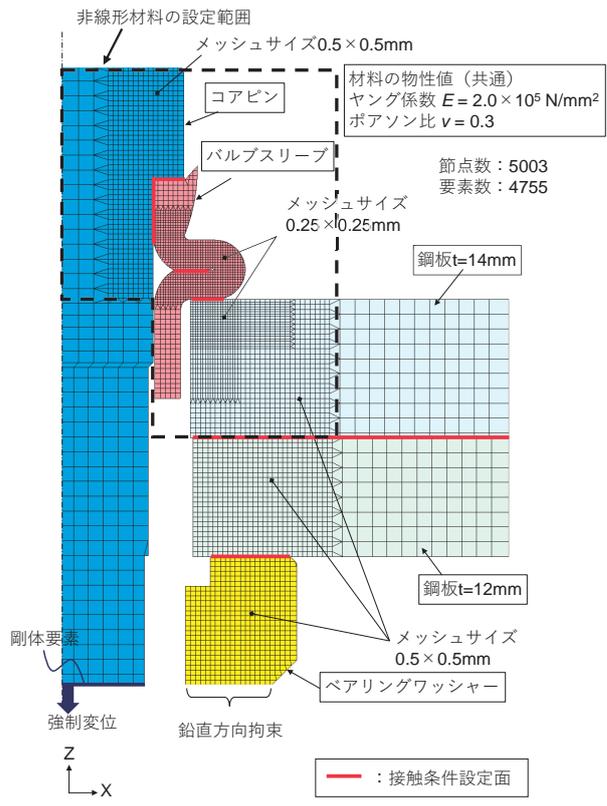


図-6 解析モデル図
Fig.6 Analysis model

解析では、軸力低下メカニズム及び実験値との比較に着目するため、これらの考察には大きな影響はないとして、実験で計測された軸力を用いることとした。なお、事前に減肉なしのモデルにおいて導入軸力160kNを生じさせるボルト下端の強制変位量(=1.459mm)を算出し、これを強制変位量として各モデルに導入した。

3.3 解析ケース

解析ケースは、バルブスリーブの減肉なしを基本ケースとし、減肉したケースとして、腐食模擬試験と同様に厚さと直径方向にそれぞれ切削した計5ケースを行った(表-2)。

バルブスリーブの腐食減肉は軸力導入した状態で要素を除去することにより解析上考慮できればよいが、本解析に用いたソフトは解析途中に要素を除去する機能を有しない。このため、減肉による応力変化を解析上考慮できるよう工夫し、疑似的に要素を除去する方法を採用した。図-8に本解析で採用した手順について示す。まず、切削のないモデルにおいて強制変位にて軸力を導入し、切削を行う範囲の境界面に作用する断面力を求めた。具体的には、切削を行う範囲の境界面を分離し、分離した節点間の全自由度を拘束条件式で結合したモデルを用いて、拘束条件式の作用力から境界面の断面力(節点力)を求めた。次に、切削範囲の要素を除いた解析モデルを用いて、切削範囲の境界面の節点に上述の断面力(節点

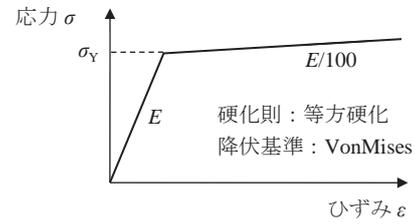


図-7 非線形材料の材料構成則
Fig.7 Material constitutive model for nonlinear materials

表-1 材料特性値

Tabel 1 Material property values

部材	材質	降伏点 N/mm ²	引張強さ N/mm ²	ヤング係数 N/mm ²	ポアソン 比
バルブスリーブ	AISI1018	370	440	2×10 ⁵	0.3
コアピン	SCM440	835	980	2×10 ⁵	0.3
鋼板	SS400	245	400	2×10 ⁵	0.3

表-2 解析ケース

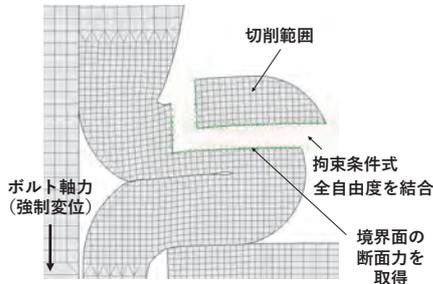
Tabel 2 Analysis case

ケース名	内容
ケースA	減肉なし
ケースB	切削による減肉 厚さ方向 2mm
ケースC	'' '' 4mm
ケースD	'' 直径方向 2mm
ケースE	'' '' 4mm

力) を作用させるとともに強制変位でボルト軸力を導入することで、あたかも切削範囲に要素があるかのようにボルト軸力導入後の状態を再現した。その上で境界面の断面力(節点力)を除荷することで要素を除去した状態を再現し、バルブスリーブ等の応力再配分を計算した。なお、各ケースにおいて軸力を導入した初期状態のバルブスリーブ周辺のミーゼス等価応力の分布を図-9に示す。各ケースで応力値や応力分布はおおむね同程度であることが確認でき、除荷前の応力状態が妥当であると判断した。

①境界面の断面力取得用モデル

切削範囲を分離して、境界面の節点間を拘束条件式で全自由度を結合したモデルにより、ボルト軸力導入時の解析を行い、境界面の断面力(節点力)を求める。



②切削範囲の徐荷再現モデル

切削範囲の境界面に、上のモデルで取得した断面力(節点力)を入力しながらボルト軸力を導入し、その後、境界面の節点力を取り除く。

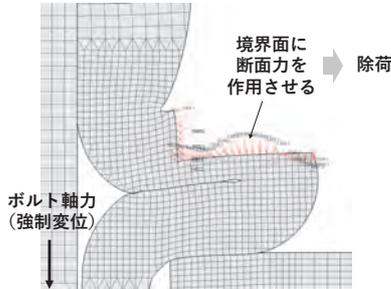


図-8 切削を再現するための解析手順

Fig.8 Analysis procedure to reproduce cutting

3.4 解析結果

(1) 残存軸力率

減肉量に対する残存軸力率について、解析で得られた結果を上述の実験結果とともに整理したものを図-10及び図-11に示す。解析により得られた残存軸力率は実験値よりも若干大きいもののおおむね整合する結果となった。厚さ方向の減肉のケースでは、減肉量に応じて線形的に軸力が低下し、直径方向の減肉のケースでは、減肉量が小さい間は軸力の低下が小さく、ある減肉量を超えると線形的に軸力低下が生じるような傾向となった。これは、実験で得られた軸力低下の傾向とも整合するもの

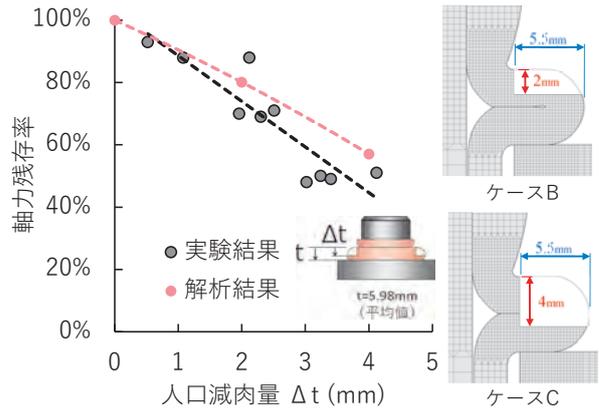


図-10 減肉(厚さ)による残存軸力の比較

Fig.10 Comparison of residual axial force due to thickness reduction

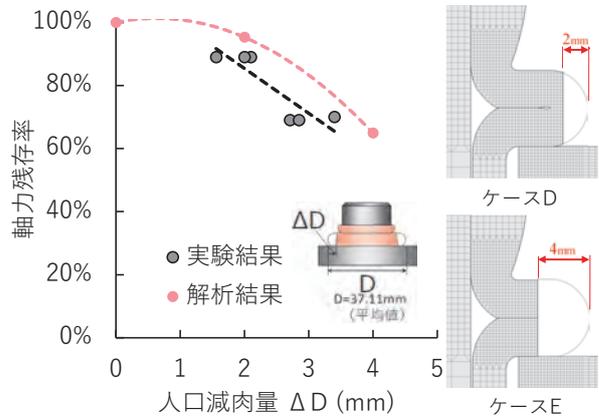


図-11 減肉(直径)による残存軸力の比較

Fig.11 Comparison of residual axial force due to diameter reduction

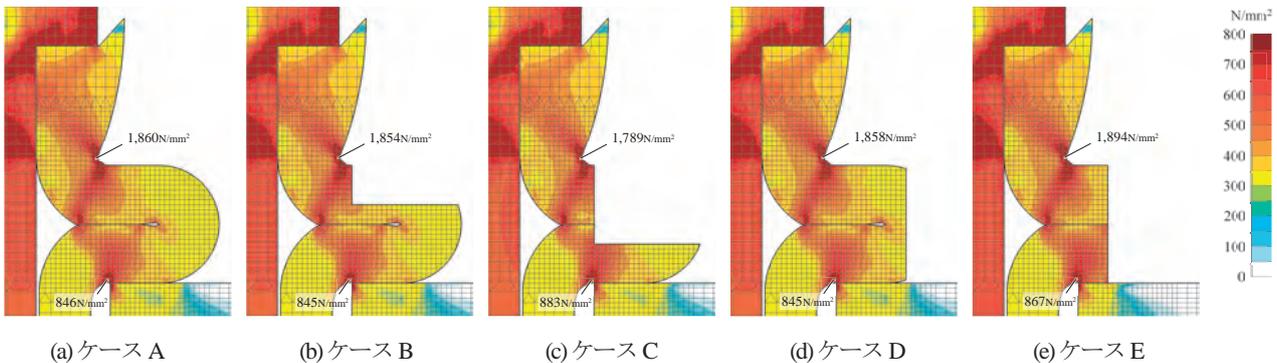


図-9 軸力導入時の各モデルのバルブスリーブ近傍のミーゼス等価応力

Fig.9 Mises equivalent stress near valve sleeve under bolt axial force loading

であった。解析と実験との軸力減少量の乖離については、実験では人工により電動工具で切削を行っており、切削形状の違いによる影響もあると考えられる。厚さ方向のケースの解析では切削幅を母材の端部までとして5.5mmと設定したが、実験ではこの幅をコントロールすることは難しい。このため、追加ケースとして、厚さ方向の解析ケースにおいて切削幅を5.5mmから6mmと大きくした場合について解析を行った(図-12)。この結果、実験と解析での軸力減少量の乖離が小さくなっていることが確認できた。

(2) 各部の伸縮量

締結構造を「①コアピン」から「⑥ベアリングワッシャー」まで6区間に区分し、各部の鉛直方向の伸縮量を積み上げて整理した結果を図-13に示す。なお、コアピンは伸長量であり、その他は圧縮量となっており、全ての伸縮量を合計するとコアピンの下部に与えた強制変位量となる。全体に占める各部位の伸縮量の大きさをみると、いずれのケースでもバルブスリーブが大きい。ラージバルブ部分の圧縮量が全体の約半分、スモールバルブ部が約2割を占めるが、コアピン自体の伸長量は全体の1割程度と小さい。バルブスリーブを切削するケースでは、切削による断面減少の影響(圧縮量の増加)と、軸力抜けによる影響(圧縮量の減少)が複雑に関与するが、結果としてラージバルブ部の圧縮量の変化は4%程度である。ここで、切削の影響により②スモールバルブから⑥ベアリングワッシャーまでの部材が圧縮される量と①コアピンの長さが縮む量は同じとなる。このことから、切削の影響によるコアピンの長さの変化は軸力導入による伸長量に対して占める割合が大きく、その変化率は、軸力低下率とおおむね比例関係にあることが確認できた。

(3) 応力分布

切削なしの基本ケースであるケースAの3方向の垂直応力分布を図-14に示す。鉛直方向の応力に着目すると、コアピンから鋼板を結ぶ最短経路上に大きな圧縮力が作用することが確認できる。一方で円周方向の応力に着目すると、バルブスリーブの外側に大きな引張応力を生じていることがわかる。これは、大きな鉛直力を受けるバルブスリーブがポアソン効果により外側に膨らむ作用を抑えつけるフープ応力(内圧を受ける管の円柱方向に発生する応力)であると考えられる。また、これに釣り合うように、放射方向にも圧縮応力が作用しコアピンを押し付ける様子も確認できる。このように、バルブスリーブ部は、その全体を使って合理的に鉛直力に抵抗していることが確認できた。

バルブスリーブ切削後(除荷後)のバルブスリーブ近傍のミーゼス等価応力を図-15に示す。減肉のないケースAに着目すると、バルブスリーブの最外縁に至る広範囲において、降伏点($\sigma_y=370\text{N/mm}^2$)程度以上の応力が発生している。また、母材も内縁側(孔周辺)がバルブスリーブにより押しつぶされるように変形し、バ

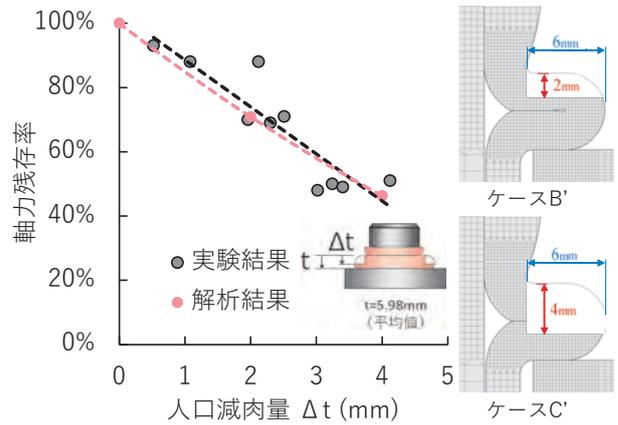


図-12 減肉(厚さ)による残存軸力の比較(切削幅6mm)

Fig.12 Comparison of residual axial force due to thickness reduction(2)

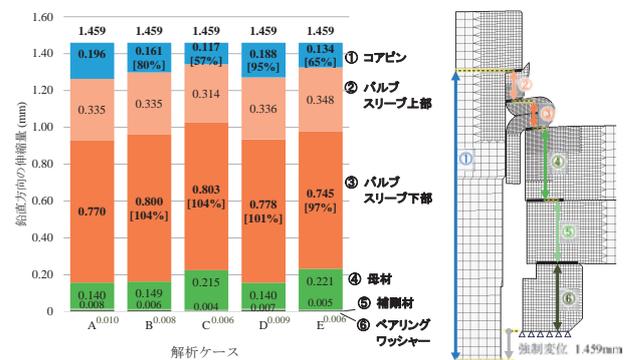


図-13 各部の伸縮量の内訳

Fig.13 Expansion and contraction of each part

ルブスリーブとの接触部付近において塑性化が生じることが確認できる。

バルブスリーブを切削することによるバルブスリーブと母材の局所的な挙動に着目すると、直上が切削される接触面外縁側のバルブスリーブ及び母材の応力が減少し、接触面内縁側の応力が大きくなっている。しかし、内縁部の母材の応力増加は最大で1.13 (=933/829)倍であり、切削によるバルブスリーブ内での応力集中はあまり生じておらず、外側の応力低減を内側の応力増加で補う応力再配分の効果は少ないと考えられる。一方で、コアピンの応力に着目すると切削に伴い応力が大きく低減している様子も確認できる。バルブスリーブは軸力導入により圧縮側で塑性化している状態であり、切削の影響により圧縮されることになるが接線剛性が小さいため、応力の増は小さい。一方のコアピンは、軸力導入後、引張応力が導入されるが、切削に伴うバルブスリーブ等の圧縮の影響で軸力は抜ける挙動(除荷される方向)となるため、塑性化しているバルブスリーブ等より接線剛性が大きく、応力の変化が大きい。

これらのことから、切削によるバルブスリーブの残断面の応力負担の増加(応力再配分)が少なく、断面欠損部が受け持っていた応力負担の喪失分がほぼそのまま軸力低下につながっていると考えられる。

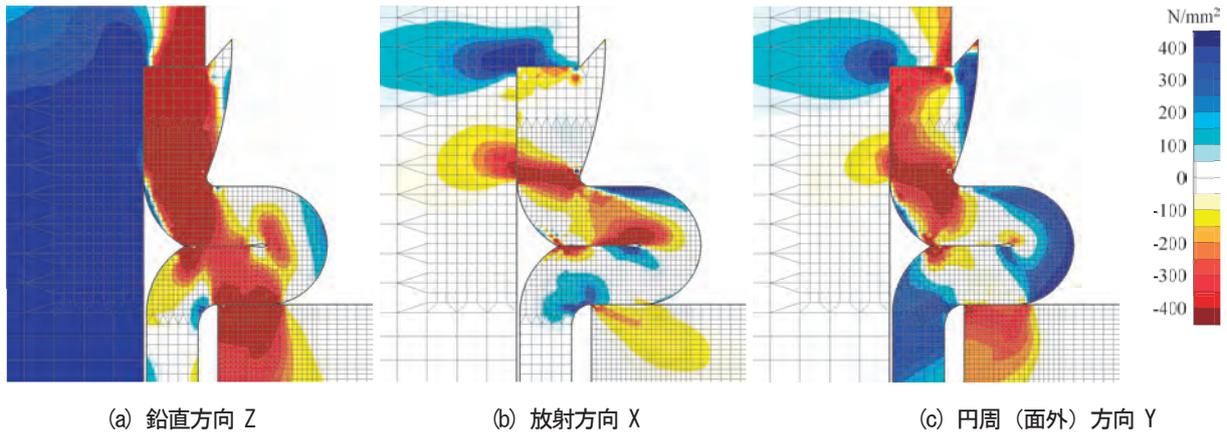


図-14 バルブスリーブ近傍の垂直応力 (ケース A)

Fig.14 Normal stress near valve sleeve (Model A)

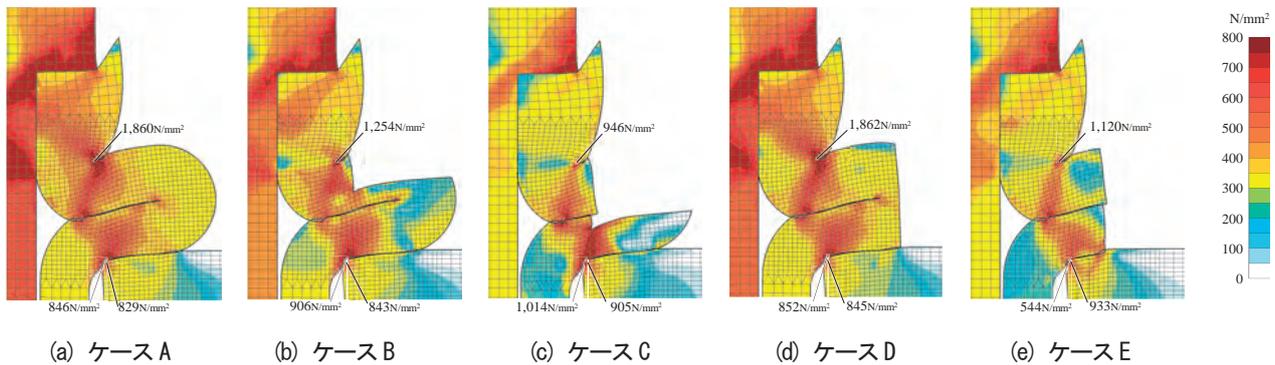


図-15 切削後のバルブスリーブ近傍のミーゼス等価応力 (変形倍率=2倍)

Fig.15 Mises equivalent stress near valve sleeve after cutting

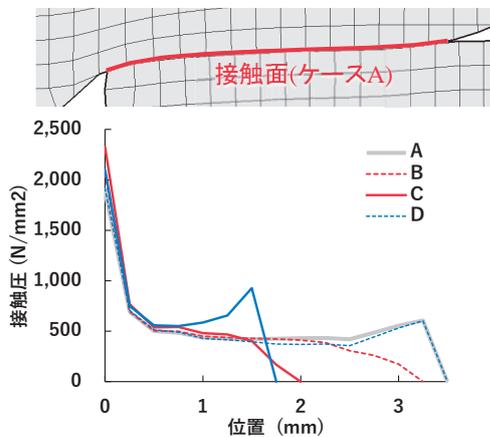


図-16 母材との接触面の接触圧の分布

Fig.16 Contact pressure on contact surface with steel plate

(4) 接触圧分布

バルブスリーブの母材との接触面の圧力 (接触圧) の分布を図-16 に示す。接触圧の分布はボルト孔に接する内縁側が突出して大きい形状となる。切削なしのケース A における最内縁 (0mm) のピーク値は、1,855N/mm² であるが、切削ケースのケース B から E のピーク値はケース A の 1.02~1.23 倍程度である。また、内縁から 0.5mm 以上離れた外側の接触圧はおおむね一定であり、全体的な分布形状もケースによる大きな違いは見られない。こ

れらから、バルブスリーブが減肉することで、最内縁の局所的な接触圧は若干大きくなるものの、全体的な接触圧の変化は小さく、切削により外縁部の接触圧が減少した分だけ軸力が減少していると考えられる。

4. 腐食促進試験

4.1 概要

ここでは、片側施工高力ボルトのバルブスリーブの耐食性を確認するため、腐食促進試験を行った。

4.2 供試体概要

供試体は計8体とし、板厚25mmの鋼板(190×90)に片側施工高力ボルト1本が締付けられている形状とした。鋼板の塗装仕様は実構造を考慮してD-5塗装系とした。試験対象はボルト頭側 (バルブスリーブ露出側) とした。ナット側はボルトキャップの取付けにより、もらいさび等が生じないようにした。

腐食量を評価するため、事前に片側施工高力ボルトを分解し、バルブスリーブの重量を計測した。なお、腐食による減肉寸法は微小であることから、腐食量により評価することとした。供試体の組立ては、供試体用鋼板に片側施工高力ボルトを取付け、専用の締付け工具で締付け作業を行った。

4.3 複合サイクル試験方法

本試験ではJISに規定されていることや、実環境との相関性が高いという既存の研究成果⁹⁾に基づいて、JIS K 5600-7-9のサイクルDの複合サイクル試験を採用した。サイクルDの複合サイクル試験の概要を図-17に示す。本試験は200サイクル（約1.7カ月）とした。50サイクルごとに供試体を2個ずつ取り出し、バルブスリーブの重量の測定を実施した。なお、重量計測はさび除去作業を行った後に行った。さび除去方法は表-3に示す。

伊藤ら⁹⁾は環境促進実験が大气暴露実験の何年分に相当するかについて促進倍率として算出している。これによれば、四国の海岸部（飛来塩分量0.231mdd、海岸線からの距離0.1km）の促進倍率が14と算出されている。この促進倍率を用いれば200サイクル（1サイクル6時間）の腐食促進実験は四国の海岸部で700日間大气暴露していたことと同等の評価となる。なお、実橋は箱部材内部であること等から上記よりは環境は穏やかであると考えている。

4.4 試験結果

(1) 外観観察

外観写真を写真-4に示す。バルブスリーブとコアピン頭部にさびが発生した。一方、供試体用鋼板内部に位置するバルブスリーブの一部、コアピンの軸部、グリップスリーブにはさびは発生しておらず、部材内部までは腐食が進行していないことを確認した。また、さび落とし後のバルブスリーブにおいて腐食による凹凸を確認した。

(2) 腐食減耗量（重量計測）

バルブスリーブの重量計測結果を図-18に示す。試験前からさび除去後の重量差をバルブスリーブの腐食減耗量としている。バルブスリーブの腐食減耗量はサイクル数に対して比例関係で増加した。このことから、バルブスリーブは腐食環境に置かれると経年的に腐食が進行する材料であるといえる。

4.5 軸力低下の推定年数

ここでは腐食促進試験の結果から、バルブスリーブの経年的な腐食減肉量を推定し、軸力が低下するまでの年数の推定を試みた。軸力については、参考として残存軸力90%、50%となるまでの年数として算出した。なお、腐食減肉量と残存軸力の関係（式(1)）は、上述の厚さ方向切削ケースの実験結果（図-3）を用いた。

$$y = -0.142x + 1.017 \quad (1)$$

ここで、 y は軸力残存率、 x は減肉量（mm）を示す。この式より、残存軸力 y が90%及び50%における腐食減肉量 x はそれぞれ0.824mm、3.641mmとなる。

次に腐食促進試験による重量減少量から減肉量を算出する。バルブスリーブの腐食を図-19のような円筒形状の板厚減少と置き換えて算出した。なお、現実にはバルブスリーブは締付けにより円筒形状ではなくなるが、

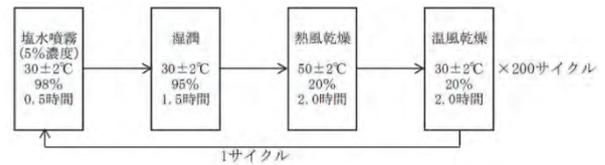


図-17 複合サイクル試験条件

Fig.17 Combined cyclic corrosion test conditions

表-3 さび除去方法

Table 3 Rust removal method

使用試薬	塩酸/富士フィルム和光純薬製 試薬特級 (JIS K 8180 適合) ヘキサメチレンテトラミン/富士フィルム和光純薬製 試薬特級 (JIS K 8847 適合)
試薬作成方法	塩酸 500mL にヘキサメチレンテトラミン 35g を加え、蒸留水を加えて 1000mL に定容。
さび除去方法	サンプルを試験液に 15 時間浸漬しさびを除去。その後、純水洗浄及びエアブローを行い、50°C の恒温槽で 2 時間以上乾燥を実施。



写真-4 試験前（左）と 200 サイクル後（右）の外観

Photo 4 Appearance before the examination (left) and after 200 cycles (right)

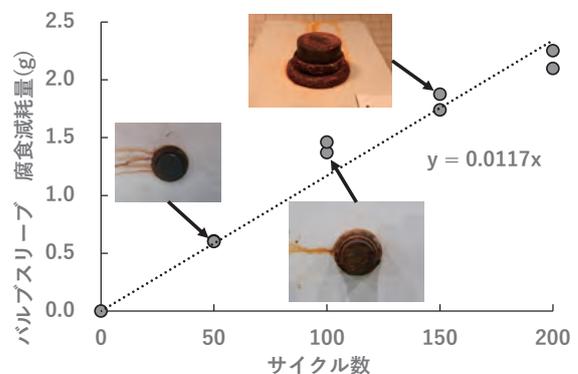


図-18 腐食減肉量（重量）

Fig.18 Corrosion loss (weight)

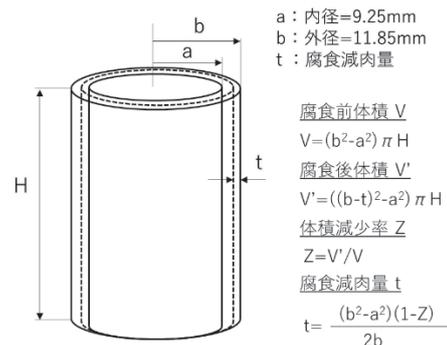


図-19 腐食減肉量の推定

Fig.19 Estimation of thickness reduction

腐食促進試験で部材内部までは腐食は進行していない結果であったため、計算の簡便のためこのような仮定を行った。200 サイクル後の供試体の試験前後の重量は62.7g (試験前), 60.5g (試験後) であり、重量変化率と体積変化率が同じ (0.9649 倍) であるとする、200 サイクル後の供試体の腐食減肉量 t は 0.0812mm と算出される。なお、実際にはバルブスリーブの 1/3 程度はボルト孔内に入って外部に露出されないため、実際の減肉量は算出されたものより大きくなると想定される。

上記の算出結果を用いて、残存軸力 90% 及び 50% となるまでの推定年数を次のとおり算出した。なお、本推定年数は、軸力低下までのおおむねの期間を把握するために様々な仮定の基に算出したものであるため注意が必要である。

残存軸力 90% に低下するまでの推定年数

$$\frac{700 \text{ 日}/365 \text{ 日}}{0.0812\text{mm}} * 0.824\text{mm} = \text{約 } 19 \text{ 年}$$

残存軸力 50% に低下するまでの推定年数

$$\frac{700 \text{ 日}/365 \text{ 日}}{0.0812\text{mm}} * 3.641\text{mm} = \text{約 } 86 \text{ 年}$$

5. 実橋調査

5.1 概要

実橋においてバルブスリーブが腐食している片側施工高力ボルトの残存軸力を把握するために実橋での軸力測定を行った。軸力測定方法は、ナット部の超音波透過量測定 (以下「超音波測定」という) による軸力測定を実施した。片面施工高力ボルトはナットとコアピンのねじ部が部材外面にあるが、ボルトキャップにより防食されているため、健全な状態であると考えてナット部で測定できる手法として選定した。なお、計測した片面施工高力ボルトは計測時点で施工後6年程度経過しているものである。

5.2 超音波測定による軸力測定概要

今回適用した超音波測定は、ナット側面に測定端子を取りつけ、送信側探触子から送信した超音波を対面の受信側探触子で受信し、締付け力の強弱によって生じる超音波の透過量の差から軸力を推定する方法⁷⁾である。この方法はボルトに特別な加工をする必要がなく、比較的簡易に測定することが可能である。超音波の透過量はボルトの軸力に応じたボルトの噛み合い具合により変化する。ボルト軸力が低い (噛み合い具合が悪い) 場合は、**図-20**の右側の図 (図は軸力ゼロの場合を示す) のように、軸部を避けるように透過パルスが伝搬し対面側で受波するため、透過量が小さい。逆に軸力が高い (噛み合い具合が良い) 場合は、透過量が大きくなる。この現象を利用して軸力を推定している。

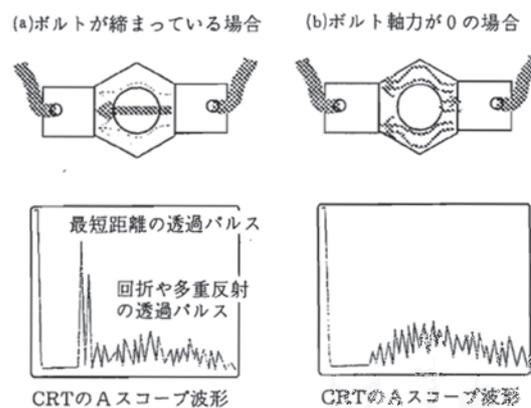


図-20 超音波の透過量による軸力測定原理⁷⁾

Fig.20 Principle of ultrasonic measurement

5.3 軸力換算式の決定

超音波測定による高力ボルトの軸力測定を行うためには調査対象とするボルトと同じメーカーかつ同径・同種のボルトを用いて事前に実験により決定しておく必要がある。ここで、超音波測定器では超音波透過量を増幅率に換算されて計測されるため、ボルト軸力換算式は次式となる。

$$y = ax + b \quad (2)$$

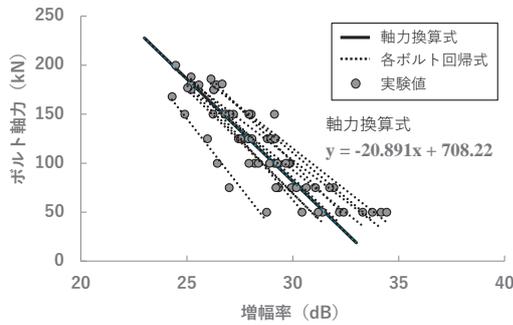
ここで、 y は推定軸力値 (kN), x は増幅率, a 及び b は実験により求める係数を示す。なお、増幅率は測定した超音波透過量を基準高さに合わせた透過量とするために調整するものであるため、軸力が低いほど増幅率は大きく、軸力が高いほど増幅率は低くなる。

実橋調査に先立ち、今回計測対象とする片面施工高力ボルトと同じメーカーかつ同径・同種のボルトによりキャリブレーション試験を実施した。まず、片面施工高力ボルトを油圧式軸力計に設置し、ピンテールが破断するまで締付けて軸力を導入した後、超音波測定を行った。その後、片面施工高力ボルトをラチェットレンチで少し緩めて超音波測定を実施し、再度緩めるといった作業を繰り返した。測定間隔は約25kNとし、測定はナット対面を3箇所測定してその平均値を用いた。測定したボルト本数は10本とした。

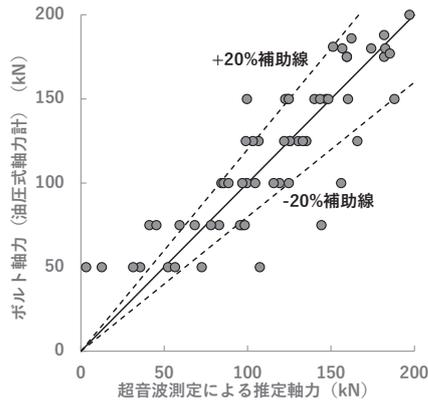
図-21に増幅率と油圧式軸力計により得られた軸力との関係を示す。また、同図には、10本それぞれの測定値を線形回帰することで得られた係数 a , b を平均して設定した軸力換算式を実線で示した。**図-22**に設定した超音波測定結果から軸力換算式により推定した軸力と油圧式軸力計により計測した軸力の関係を示す。図中に示した $\pm 20\%$ の補助線を範囲を超える軸力値もあるものの、多くの軸力推定値はこの範囲内にあることから、本手法による軸力推定精度は $\pm 20\%$ 程度であると想定している。

5.4 実橋調査

実橋での測定はバルブスリーブに腐食が確認されている番の州高架橋トラス部の格点KT4主横トラス下弦材の



図一21 増幅率とボルト軸力
Fig.21 Gain and bolt axial force



図一22 超音波測定による推定軸力と測定軸力
Fig.22 Ultrasonic measurement results and bolt axial force

東側現場継手部に施工されている片側施工高力ボルトを対象とした。対象は現場継手部周辺の非密閉部の箱断面の上下側面の各パネルから3本ずつ任意に抽出した計12本と、ダイアフラムにより密閉されておりバルブスリーブは健全であると想定される密閉部において3本の計15本を対象に計測した。計測は、防食のために施工されていたボルトキャップ及び塗膜を除去したうえで、測定面となるナット側面は電動工具（マジクロン）により素地調整をしたうえで行った。測定探触子はナット対面に設置し、異なる面の3箇所を測定し、その平均値を採用した。計測時の様子を写真一5に、残存軸力の測定結果を表一4に示す。いずれのボルトにおいても設計ボルト軸力である177kN以上あることが確認できた。また、健全と想定している密閉部のボルトと同程度の軸力値が得られた。なお、非密閉部のWEB側面（南）側のみ他と比べて軸力値が小さいが、その違いは1割程度であること、当該ボルトのバルブスリーブのみ著しい腐食が生じているわけではないことから、測定誤差の範囲内であると考えた。以上から、外観では腐食しているものの現時点ではボルト軸力に大きく影響のある腐食までは至っていないと推測される。

松村ら⁹⁾は鋼板パネルに局部座屈抑制対策としてボルト接合により補剛材を追加する場合の補強効果について圧縮力載荷試験、FEM解析により検討している。実験においては、補剛材の設置は座屈防止を目的としておりボルトへの十分な軸力の導入は必ずしも要求されないとし、



写真一5 ボルト軸力測定状況
Photo 5 Bolt axial force measurement on-site

表一4 残存軸力測定結果
Table 4 Residual axial force measurement results

単位：kN

No.	非密閉部（腐食有）				密閉部
	U-FLG	L-FLG	WEB（北）	WEB（南）	WEB（南）
1	217.3	215.2	219.4	188.0	229.8
2	223.5	231.9	231.9	183.9	227.7
3	211.0	221.5	217.3	223.5	208.9
平均	217.3	222.9	222.9	198.5	222.1

設計ボルト軸力の2分の1を目標に締付けられた供試体により実験が行われ、その補強効果が確認されている。また、解析においては、締付けボルト軸力が補強効果に及ぼす影響について検討されている。ボルト軸力が小さい場合（軸力ゼロのケース）では、補剛材への荷重伝達が期待できないため初期剛性は補強前の板パネルと同等であるものの、補剛材により板パネルの面外変形が抑制されるため、締付けボルト軸力は最大荷重、最大荷重後の挙動に影響を及ぼさないことが確認されている。これらの結果から、局部座屈強度を向上させることを目的にボルトで補剛材を追加する場合のボルト軸力については、設計ボルト軸力に対して2分の1程度の軸力低下は補強効果には問題とされないと考えられる。

6. おわりに

片側施工高力ボルトのバルブスリーブの腐食が残存軸力に及ぼす影響について、実験及び解析により検討した。また、腐食促進試験によるバルブスリーブの耐食性の確認、実橋における残存軸力の測定を行った。得られた結果を以下に示す。

- 1) バルブスリーブの減肉量に応じてボルト軸力が低下することを確認した。このことからバルブスリーブの腐食の進行に伴い、導入軸力が低下することが考えられる。
- 2) バルブスリーブの腐食による減肉量が把握でき

ば軸力残存率についておおむね把握可能であることを確認した。

- 3) 解析手順を工夫し、疑似的に要素を除去することで軸力が導入した状態から腐食減肉による断面減少の影響について評価できることを確認した。
- 4) バルブスリーブが腐食により減肉しても、バルブスリーブ内での応力再配分や変形は小さく、そのほとんどが軸力低下に影響を及ぼしていることを確認した。これは、軸力導入により大きく圧縮変形するバルブスリーブが塑性化状態となっていることが大きく影響していると考えられる。
- 5) バルブスリーブはボルト軸力に対してポアソン効果でラージバルブが膨む作用を抑え込むフープ応力が働いており、その全体を使って合理的に鉛直力に抵抗していることを確認した。
- 6) 腐食模擬試験と腐食促進試験の結果から、四国の海岸部で大気暴露しているとした場合、残存軸力が90%となるのに19年程度、50%となるのに約86年程度と試算した。
- 7) 実橋において、片面施工高力ボルトのナット部の超音波の透過量から残存軸力を測定した。その結果より、現時点において軸力に影響のある腐食までは至っていないことを確認した。
- 8) ナット部の超音波の透過量による軸力推定法について、今回使用した片側施工高力ボルトの軸力推定精度は±20%程度であることを確認した。

今回確認した変状から、箱部材内部であっても密閉されていない環境では、本橋梁で用いた片面施工高力ボルトのバルブスリーブは腐食するといえる。また、(一社)日本鋼構造協会の設計・施工指針⁹⁾においても片面施工高力ボルトの適用条件として密閉断面であることが示されている。このため、今回の調査結果を踏まえて、今後は密閉されていない環境では片側施工高力ボルトを使用しないことを周知徹底するとともに既に密閉されていない環境に用いられた片側施工高力ボルトの点検・診断、補修方法等について検討を進めていく予定である。

また、片側施工高力ボルトに限らず、閉断面部材であっても、今回腐食が確認されたように現場継手部においては、板の突合せ部にすき間を有する(鋼橋等製作基準¹⁰⁾における許容値は5mm)ため、部材内面の腐食に着目した点検を行うとともに、その状況に応じて防食対策を検討する必要があると考える。

謝辞

本論文中の解析にあたっては、大阪公立大学大学院山口隆司教授に貴重な助言をいただくとともに、(株)フセランにはモデル化にあたって必要となる片側施工高力ボルトに関する各種情報提供をいただいた。また、解析結果のとりまとめにあたっては、(株)総合技術コンサルタント渡邊氏に多大な協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) (公社)土木学会：補修・補強のための高力ボルト摩擦接合技術-当て板補修・補強の最新技術-，鋼構造シリーズ37，2021。
- 2) 田井政行，長嶺由智，鶴田滉，下里哲弘：腐食減肉量に基づく高力六角ボルトの残存軸力評価手法の検討，鋼構造論文集，第27巻，第106号，2020.6
- 3) 坂田鷹起，和田直樹，木村元哉：高力ボルトの腐食形状が残存軸力に及ぼす影響，土木学会第71回年次学術講演会，I-413，2016。
- 4) 南邦明，田村洋，内田大介，白旗弘実，吉岡夏樹，筒井康平，藤野大地：高力ボルト継手のリラクゼーション試験における初期値の設定について，土木学会論文集A1(構造・地震工学)，Vol.76，No.3，pp.496-509，2020。
- 5) 鈴木博之，川辺裕一，藤永政司，中島一浩：高力ワナサイドボルト摩擦接合継手の基礎的特性，鋼構造年次論文集，15巻，2007年11月
- 6) 伊藤義人，岩田厚司，貝沼重信：鋼材の腐食耐久性評価のための環境促進実験とその促進倍率に関する基礎的研究，構造工学論文集，Vol.48A，2002
- 7) 池ヶ谷靖：超音波によるボルト軸力計，検査技術，Vol.3，No.1，pp.14-19，1998.1
- 8) 松村政秀，幸田真也，小野潔，山口隆司：ボルト接合されたL字形材による鋼板パネルの補強効果に関する研究，構造工学論文集，Vol.63A，pp.749-762，2017.3。
- 9) (一社)日本鋼構造協会：道路橋の補修・補強に用いる片側施工高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工指針，JSS IV 14-2023，2023.3
- 10) 本州四国連絡橋公団：鋼橋等製作基準・同解説，1993.5

温度ギャップ装置の現状と今後の展望

Current status and future prospects of Temperature-Gap equipment

後藤 稜平 Ryohei Goto

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4課
(兼) 事業調整部 事業調整課
(兼) コンサルティング部

横井 芳輝 Yoshiteru Yokoi

長大橋・技術部
技術革新・アセットマネジメント課長代理
(兼) 保全部橋梁保全課長代理

概要

本四高速道路では、鋼床版のデッキプレートとUリブとのすみ肉溶接部のビード（以下「Uリブ溶接ビード」という。）に生じる亀裂を対象に、赤外線サーモグラフィカメラを用いた温度ギャップ検知による疲労亀裂検出技術で疲労点検を2014年度から実施している。本四高速道路は多数の鋼床版を有していることから、設計年度や構造ディテール、累積大型車交通量などを考慮して点検対象箇所を選定し、開発した点検システムを用いた点検を実施してきた。点検に用いている温度ギャップ装置についても、現場条件や効率性の観点から点検撮影方式や通信方式の改良及び自動亀裂検知ソフトの開発も実施してきた。

本稿は、これまでの温度ギャップ装置による疲労点検の実績、現状での温度ギャップ装置の性能と計測条件及び、温度ギャップ装置の今後の展望について報告する。

In the Honshu-Shikoku Bridge Expressway, fatigue inspection using an infrared thermography has been conducted to find fatigue cracks occurring on weld beads between deck plates and trough ribs by detecting temperature gaps since 2014. The Expressway has a large number of steel decks. Therefore, the inspection using developed system has been conducted by selecting inspection targets based on design year, structural detail, and cumulative large vehicle traffic volume. For the Temperature-Gap system, improvements of capture method and data transmission and development of automated crack detection software were conducted in terms of site environment applicability and working efficiency. This paper reports the past results, the current performance and measurement conditions, and the future direction of the Temperature-Gap device.

1. はじめに

本四高速道路は、主に海峡を跨ぐ長大橋において、死荷重軽減を目的に鋼床版が適用されており、橋梁延長約26km（車線延長では約100km）、床版面積約470千m²の多くのストックを有している。近年、鋼床版では、大型車両を原因とした疲労損傷が多く報告されている。本四高速道路においても主に鋼床版のデッキプレートとUリブのすみ肉溶接部数十箇所、溶接ビードを貫通する亀裂（以下「ビード貫通亀裂」という）を確認しており、適宜補修等を行っているところである¹⁾。

これらの疲労による亀裂損傷は、損傷が軽微な早期に発見することが補修コストや構造安全性の観点から重要となる。疲労亀裂の点検は、遠望からの目視点検では双眼鏡を用いたとしても検出は困難であることから、従来の点検においては、溶接部の近接目視点検により塗膜割

れの有無を確認することが基本であった。また、塗膜割れを検出した場合は、図面や輪荷重位置から疲労亀裂の存在を疑い、必要に応じて近接点検用の足場を設置し、既存塗膜を撤去し磁気探傷等により亀裂を検査することとなる。なお、疲労亀裂の疑いがある塗膜割れから実際

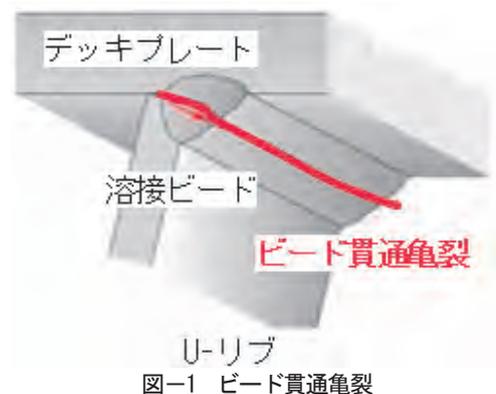


図-1 ビード貫通亀裂

Fig.1 Weld bead penetration crack

に疲労亀裂が発見される割合については10~20%程度と低いことが知られており²⁾、疲労亀裂と関係しない塗膜割れは多い。これらのことから、従来手法による点検は非効率かつ高コストであることが課題であった。

そこで、Uリブ鋼床版に発生する亀裂のうち、発生数の多いデッキプレートとUリブのすみ肉溶接部のビード貫通亀裂(図-1)に対し、赤外線サーモグラフィカメラを用いた温度分布計測に基づき、塗膜を除去することなく遠隔から非接触・非破壊で、高効率・高精度に検出可能な手法及び装置について開発がなされた³⁾。

ビード貫通亀裂を検出する原理の概要図を図-2に示す。路面が日射を受け舗装が温められると、デッキプレートからUリブへと熱が伝わる。溶接部に亀裂が存在する場合は、亀裂部の微小な空隙により熱伝導が阻害され、亀裂部では健全部と比較し大きな温度差(以下「温度ギャップ」という。)が生じる。この温度ギャップを、赤外線サーモグラフィカメラを用いて検出することにより、亀裂を検出する。(以下「温度ギャップ法」という。)

本稿では、主に温度ギャップ法による点検に用いている温度ギャップ装置(図-3)に着目し、開発経緯や実績、改良の取組、今後の展望について述べる。

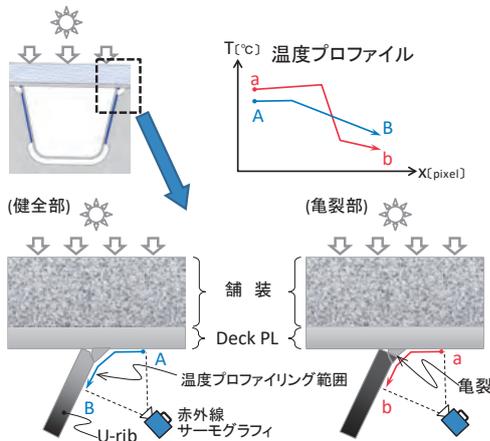


図-2 亀裂検出原理概要図
Fig.2 Overview of crack detection principle



図-3 現状の温度ギャップ装置の外観
Fig.3 Appearance of the current Temperature-Gap equipment

2. 経緯及び実績

2.1 経緯

2011年度に門崎高架橋においてビード貫通亀裂が発見されたことを受け、将来的に大型車の累積交通量が増えるに従って多数の亀裂が顕在化することを懸念し、損傷を早期に効率よく発見できるスクリーニング手法の検討を実施していた。当初は、渦流探傷による試行を実施していたが、2011年度から実施された本州四国連絡高速道路(株)と神戸大学との共同研究において、赤外線サーモグラフィを用いた疲労損傷評価の研究過程で温度ギャップ法による亀裂検出の有効性が確認されたため、2013年度から専用装置等の開発を開始した。

2012~2014年度は門崎高架橋において、上部桁外面作業車上に三脚を用いて赤外線サーモグラフィカメラを設置し、上部桁外面作業車を橋軸方向に走行させることで、Uリブ溶接ビードを連続撮影し、撮影した映像を目視で全てを確認することで、亀裂の有無を判定していた。

亀裂がある箇所の温度画像例を図-4に示す。図上部の画像中央に、横方向にUリブ溶接ビードが映っている。健全部(A)と比べて、亀裂部(B)では、ビード貫通亀裂により温度が伝達されず、亀裂を境に温度が低くなるため、亀裂からUリブにかけて健全部より黒く表示されていることがわかる。このように、目視で確認するには、撮影した温度画像を見ながら、図-4に示すような黒い影(温度低下部)などの箇所を発見した場合、温度勾配グラフを作成し、温度ギャップの有無を確認することで、亀裂の有無を判定するものである。

2015年度からは累積大型車交通量や鋼床版の構造が同種である瀬戸大橋を点検対象に追加している。瀬戸大橋では、門崎高架橋のように外面作業車を橋軸方向に走行させながら連続的に撮影することはできないため、小型

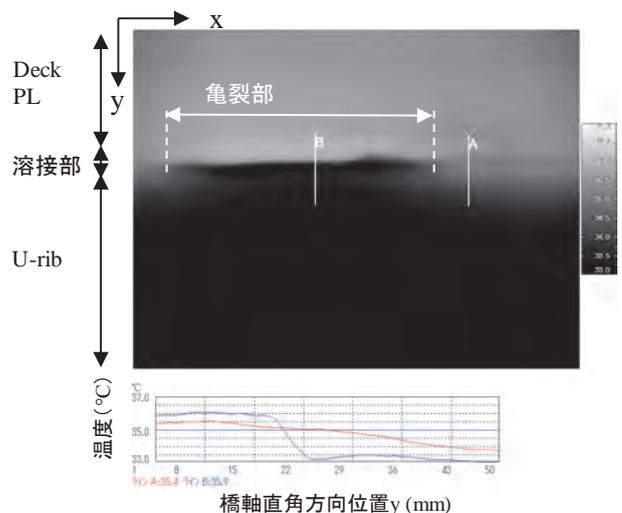


図-4 撮影映像と温度勾配の例
Fig.4 Example of captured video and temperature gradient

台車上に赤外線サーモグラフィカメラを固定し、小型台車に接続したワイヤーを巻き取ることで橋軸方向に移動させ、点検対象となるUリブ溶接ビードの連続撮影を行った。更に、作業効率を向上させるために、内面作業車に設置した専用のガイドレール上を自走させることで連続撮影が可能な温度ギャップ装置の1号機（図-3）を製作した。

2016年度からは、温度ギャップ装置の1号機を用いて、北備讃瀬戸大橋におけるガイドレールによる疲労点検を実施した（図-5）。

また、ビード貫通亀裂周辺部の温度分布には、健全部と比較し特異な温度低下部があることから、亀裂検出には、検出アルゴリズムを考案し、亀裂の可能性がある箇所を自動検出するソフトを開発した。更に、累積大型車交通量が同程度の他橋での疲労点検を開始すること、及び機器トラブル時の代替機として、温度ギャップ装置の2号機を製作した。

2018年度からは点検対象に大鳴門橋を追加した。大鳴門橋は、おおむね瀬戸大橋と同様の手法で連続撮影が可能であるが、輪荷重位置が鋼床版縦桁に隣接しており、Uリブ溶接ビードをガイドレール方式で撮影するには、温度ギャップ装置を設置する空間が手狭なため不可能であった。そのため、縦桁下フランジに治具を設置して橋軸方向の連続撮影を可能にする縦桁近傍撮影装置（図-6）を製作した。



図-5 ガイドレールによる計測
Fig.5 Measurement using guide rails



図-6 縦桁近傍撮影装置
Fig.6 Longitudinal girder vicinity photographing equipment

表-1 温度ギャップ装置の平均点検作業数量

Table 1 Average inspection work quantity for Temperature-Gap equipment

橋梁名	平均点検作業数量	点検時使用作業車
門崎高架橋	1,227 m/日	外面作業車
大鳴門橋	111 m/日	内面作業車
瀬戸大橋	378 m/日	内面作業車

2.2 本四高速道路での点検実績

本四高速道路は多数の鋼床版を有していることから、設計年度や構造ディテール、累積大型車交通量などを考慮して点検対象箇所の優先順位をつけ、点検を実施している。2015～2022年度において、温度ギャップ装置を用いた疲労点検を実施した橋梁は、神戸淡路鳴門自動車道の門崎高架橋・大鳴門橋、瀬戸中央自動車道の下津井瀬戸大橋・櫃石島橋・岩黒島橋・与島橋・北備讃瀬戸大橋・南備讃瀬戸大橋・番の州高架橋トラス部の計9橋であり、調査した溶接延長は、約130kmである。なお、これまでの温度ギャップ法による点検でビード貫通亀裂が検出された橋梁は、門崎高架橋のみである。その他の橋梁においては現時点で疲労亀裂の検出はされていないものの、大型車交通量の増大とともに今後発生することが想定される。そのため、一定間隔ごとの調査は必要であると考えられる。

2.3 温度ギャップ装置の点検作業数量

温度ギャップ装置を用いた点検で1日当たり点検が可能なUリブ溶接ビードの溶接延長を表-1に示す。これは、門崎高架橋が2018年度、大鳴門橋と瀬戸大橋が2021年度の疲労点検実績より算出した。

各橋梁における点検対象の位置関係について、門崎高架橋を図-7、大鳴門橋を図-8、岩黒島橋を図-9に示す。温度ギャップ装置による疲労点検の対象となる走行車線の輪荷重直下のUリブ溶接ビードと温度ギャップ装置との位置関係は、後述する適切な撮影角度と撮影距離で制限される。そのため、温度ギャップ装置の配置可能位置が限られ、管理路から点検するUリブ溶接ビード（図-7青矢印部）と桁内面作業車を用いて点検するUリブ溶接ビードがある。大鳴門橋・瀬戸大橋の実績については、桁内面作業車を用いた点検のみの実績であり、管理路から点検するUリブ溶接ビードは含んでいない。

表-1に示す平均点検作業数量は、門崎高架橋が外面作業車を使用し、橋軸方向に連続走行する距離が長いこと、作業効率が良いことがわかる。また、大鳴門橋や瀬戸大橋では、内面作業車での点検であり、橋軸方向に連続する撮影ができないため作業効率が低い。

大鳴門橋と瀬戸大橋での点検作業数量に差がある理由は、内面作業車の橋軸方向の長さや構造が違うため、内面作業車上に設置する装置専用ガイドレール長さが、大鳴門橋で5m、瀬戸大橋では2倍の10mであり、一度の走行で点検できる溶接延長に差があるためである。更に、

ひとつの格点間での移動効率に関して、大鳴門橋の内面作業車は、作業床の上昇や張出し作業などひとつの格点間内での移動が多く、位置決め移動時間が長くなる。そのため、大鳴門橋と比べて瀬戸大橋の作業効率が良い。

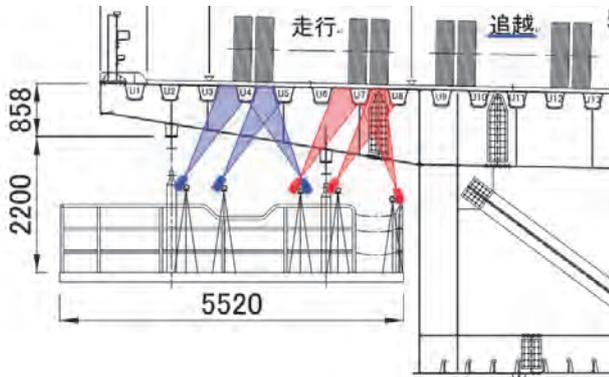


図-7 点検対象の位置関係 (門崎高架橋)
Fig.7 Positional relationship of inspection targets (Tozaki Viaduct)

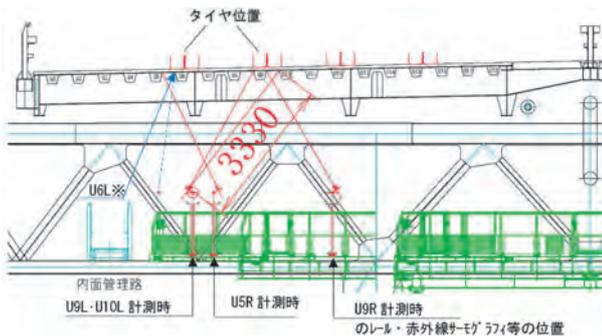


図-8 点検対象の位置関係 (大鳴門橋)
Fig.8 Positional relationship of inspection targets (Onaruto Bridge)

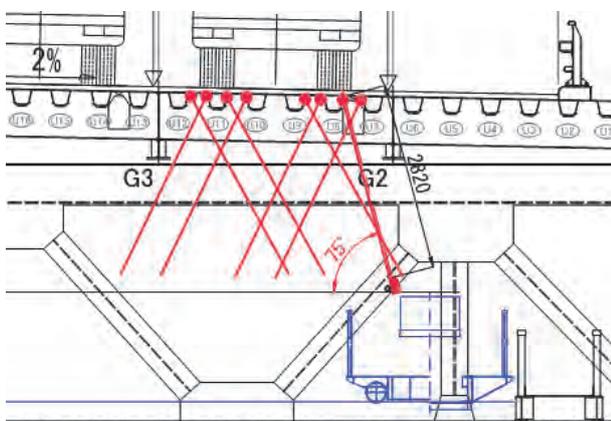


図-9 点検対象の位置関係 (岩黒島橋)
Fig.9 Positional relationship of inspection targets (Iwakuroshima Bridge)

3. 現状の性能

温度ギャップ装置の性能及び使用条件を以下に示す。設定された数値の根拠及び使用条件の理由などの詳細は、文献3)、文献4)を参照されたい。

3.1 撮影方式

温度ギャップ装置は、レール台車撮影装置 (図-5) と縦桁近傍撮影装置 (図-6) の2種類を保有している。

レール台車撮影装置による撮影は、専用のガイドレールをUリブ溶接ビードと平行に設置し、リモコンで走行等の操作を行いながら撮影する。

縦桁近傍撮影装置は、縦桁下フランジに装置を挟み、人力で押しながら縦桁に沿って移動させることで、縦桁横のUリブ溶接ビードの撮影を行う。これは、縦桁と点検する溶接線が近接しているため、レール台車装置での撮影が不可能であったため開発した装置である。

装置による撮影速度は、これまでの亀裂検出性から、250mm/s以下としている³⁾。

3.2 撮影角度

温度ギャップ装置には赤外線サーモグラフィカメラを用いており、正確な温度情報を得るためには測定対象に正対して撮影することが望ましい。そのため、Uリブ溶接ビードを撮影する際は、水平から仰角45°を基本とし、現場状況により撮影角度を垂直に近づけたい場合は、水平から仰角75°を上限とする。仰角75°を超えると放射率が低下し反射率が増加してしまい、目的溶接線の適正な温度測定ができなくなるためである。

3.3 撮影距離

温度ギャップ装置を用いて、長さ40mm程度の疲労亀裂を検出するためには、鋼床版デッキプレートとUリブとの温度差が0.7°C以上、かつ撮影解像度が1mm/pixel程度必要である。文献4)で実施した基礎実験より、撮影距離を離しすぎると、撮影解像度が低下し、疲労亀裂の検出精度が低下することがわかる。撮影解像度をさらに上げることで長さ40mm未満の疲労亀裂を検出できる可能性はあるが、実橋での試験データ数を今後増やすなどの検討が必要である。

レール台車撮影装置と縦桁近傍撮影装置は、使用している赤外線サーモグラフィカメラの使用レンズが異なるため、撮影可能な距離に違いがある。それぞれの装置の使用レンズと適正撮影距離を表-2に示す。

適正撮影距離の最小値は、使用レンズの焦点調整が可能な最小距離である。最小距離未満では、赤外線サーモグラフィカメラの焦点を合わせることができないため、正確な温度測定が出来ない状態となる。

適正撮影距離の最大値は、撮影解像度が1mm/pixelとなる距離である。最大距離以上でも正確な温度測定は可能

であるものの、亀裂検出性が低下することがわかっており、例えば短い亀裂を見逃すなどの可能性がある。なお、撮影解像度1mm/pixelとは、ビード貫通亀裂の長さ40mmを検出するために必要な条件である⁴⁾。

3.4 通信方式

温度ギャップ装置の操作卓では、撮影条件の確認・入力、点検前のデッキプレートとUリブの温度差確認計測、撮影後のデータ確認などが行える。これらの操作は、撮影装置と操作卓が通信することで行っており、通信方式は、現場に応じて無線通信と有線通信に切り替えられる。

無線通信は、有線通信より作業性が良いが、現場条件により通信が切断するなどのトラブルが発生する可能性がある。通信切断の原因は、はっきりしないものの、無線通信が安定しない場合には、有線接続に切り替えて点検作業を実施できるようにしている。

3.5 自動亀裂検知ソフト

亀裂検出は、文献3)のアルゴリズムを参考に開発した自動検知ソフトで行っている。当初は、汎用型の赤外線サーモグラフィカメラにより撮影した温度画像を、汎用ソフトによる温度動画として目視により確認し、亀裂指示模様の検出をしていた。このため、内業の作業負荷が大きく、亀裂判定において個人差があるなど課題であった。2015年度以降は、自動亀裂検知ソフトの開発により内業が効率的になっている。

内業の手順は、最初に自動亀裂検知ソフトで1次判定を行い、亀裂・浮きの可能性がある箇所を自動検出する。次に1次判定で自動検出された箇所について、技術者が確認することで2次判定を行う。この2次判定は、赤外線に関する基礎知識を保有しているものが実施することとしている⁵⁾。なお、2次判定で亀裂以外として区別されるものとしては、吊りピース、汚れの映りこみ、添接ボルトなどであり、温度画像上では、大きな温度変化として現れる箇所であり、自動亀裂検知ソフトでは、可視画像を同時に表示させることにより判定者への補助機能を装備している。



図-10 撮影困難となる例

Fig.10 Examples where it is difficult to photograph

表-2 装置別の適正撮影距離範囲

Table 2 Appropriate shooting distance range for each equipment

装置	使用レンズ	適正撮影距離 (撮影解像度範囲)
レール台車 撮影装置	60mm レンズ (FLIR Tau2 640)	2.3 ~ 3.53 m (0.65 ~ 1.00 mm/pixel)
縦桁近傍 撮影装置	25mm レンズ (FLIR A65)	0.3 ~ 1.47 m (0.20 ~ 1.00 mm/pixel)

4. 今後の展望・まとめ

ここまで、温度ギャップ法による点検に用いる温度ギャップ装置について、開発経緯や改良、現在の機器性能について述べてきた。ここでは、今後の適用橋梁の拡大や更なる効率化のための課題、および現在実施している改良に向けた検討状況について述べる。

4.1 作業車が無い橋梁での連続撮影方法

過去の温度ギャップ装置を用いた疲労点検は、外面・内面作業車で適正な撮影距離・撮影角度に装置を配置しUリブ溶接ビードに正対して連続撮影が可能であった。外面・内面作業車が無い橋梁では、管理路や検査路等（以下「管理路等」という。）から撮影を行うことになる。しかし、温度ギャップ装置での赤外線サーモグラフィ撮影は、Uリブ溶接ビードに対し正対し、かつ使用するレンズの適正撮影距離の範囲で撮影する必要がある。例えば図-10に示す鋼床版橋の場合では、U7とU9の左側のUリブ溶接ビードが、管理路等から撮影することが困難となる。このような橋梁でも今後、温度ギャップ法による効率的な連続撮影方法の確立が必要と考えており、順次開発していく予定である。

4.2 自動亀裂検知ソフトの改善

自動亀裂検知ソフトは、レール台車方式による撮影方法や赤外線サーモグラフィカメラや可視カメラで撮影したデータ専用で開発を実施している。現状装置での撮影による内業の効率は良いものの、前述の多様な撮影方法や、撮影環境に対応していない。前述した新たな撮影方法の確立と平行し、自動亀裂検知ソフトの改善も行っていく予定である。

4.3 操作性の改善

開発初期は、撮影した画像データを操作卓側で保存しており、操作卓が大きく重い状況であったため、操作者は操作卓を台の上などに置いて操作していた。現状、無線によるデータ送信量を軽量化するために撮影データは撮影装置側で保存しているため、操作卓の各種スイッチや速度コントローラなどのハードボタンを廃止し、画面上で操作するタブレット型にするなど、小型化・軽量化を図る予定である。また、操作画面のUIについても改良を検討しており、操作性の向上を行う予定である。

5. おわりに

温度ギャップ法による鋼床版の疲労検出技術を橋梁点検に実装するために温度ギャップ装置を開発し、点検対象橋梁の拡大や作業効率化等の観点で改良を進めてきた内容について紹介した。今後は、様々な現場条件に応じて効率的に点検が可能となるように、更なる技術開発を進めて、疲労点検の高度化・効率化を行っていく予定である。

謝辞

本稿の内容については、神戸大学、滋賀県立大学との共同研究及びJB本四高速グループが一体となってこれまで開発されてきた温度ギャップ法及び実用化のための装置、システムの開発等の成果についてとりまとめたものである。ここに記して感謝の意を表する、

参考文献

- 1) 溝上善昭, 森山彰, 小林義弘, 坂野昌弘: Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂に対する下面補修工法の提案, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.73, No.2, pp. 456-472, 2017.
- 2) 栗原友則, 福島貴仁, 村野益巳: 過流探傷を用いた鋼橋のき裂検出効率化の検討, 土木学会年次学術講演会, I-165, pp.329-330, 2014.9
- 3) 溝上善昭, 奥村淳弘, 大藤時秀, 和泉遊以, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ法によるUリブ鋼床版のビード貫通亀裂の自動検出と装置開発, 土木学会, 構造工学論文集Vol.64A, 2018.3
- 4) 溝上善昭, 小林義弘, 和泉遊以, 阪上隆英: 赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版の亀裂検出技術, 高速道路と自動車第57巻第10号, 2014.10
- 5) 本州四国連絡高速道路株式会社長大橋技術センター診断・構造グループ: 鋼床版疲労点検マニュアル(案), 2015.3

明石海峡大橋における舗装の長寿命化に向けた取組

An Approach to Prolong the Pavement Life in Akashi-Kaikyo Bridge

武田 拓実 Takumi Takeda

神戸管理センター保全グループ

斎藤 佑太 Yuta Saito

NIPPO(株)関西支店
技術部試験所

樋口 勇輝 Yuki Higuchi

ニチレキ(株)技術研究所
研究開発3課

概要

長大橋の鋼床版上の舗装は、基層に水密性が高く、かつたわみ追従性に優れたグースアスファルトが使用され、表層に耐久性に優れた改質アスファルトが使用されている。明石海峡大橋では、供用後10年が経過した頃から、舗装表面に橋軸方向に連続したひび割れやポットホールなどの変状が発生、増加している。

そこで、明石海峡大橋の舗装に発生した変状についてFEM解析等により発生要因を推定し、その結果に基づいた舗装材料の選定及び試験施工を実施した。

本稿は、長大橋舗装の長寿命化を目的として実施した舗装補修の取組について報告するものである。

On the steel deck of long-span bridges, the guss asphalt which has a high watertightness and deflection followability has been used as a base course, and the improved asphalt which has a high durability has been used as a surface course. In Akashi-Kaikyo Bridge, degradations such as longitudinal crack and pothole were observed and the number of degradation have increased.

Therefore, we presumed the cause of the degradations by FEM analysis. Then, we chose pavement materials based on the presumption and carried out test constructions.

This paper reports the approach of pavement repair to prolong the service life of long-span bridge's pavement.

1. 明石海峡大橋の舗装について

1.1 明石海峡大橋の舗装構成

明石海峡大橋の建設時は橋面舗装基準に基づき、鋼床版の変形に追従し、かつ安定度が高く耐久性に富む材料及び舗装構成（本四改質I型+グースアスファルト混合物）が選定されている（図-1）。

舗装厚は交通量を考慮し、グースアスファルト混合物は40mm、表層（本四改質I型）は35mmの厚さで設計されている。

1.2 鋼床版舗装の維持管理

一般的な舗装の維持管理では、劣化した層を切削し、新たなアスファルト層を施工する切削オーバーレイ工法や全層の打換え工法等が採用される。

しかし、鋼床版舗装のグースアスファルト混合物を打換える場合は、その施工温度が約240℃にも達するため、熱による鋼床版の変形や塗装への影響に対して高度な品質管理が要求されることやコストが割高になるという課題がある。

このことから、鋼床版舗装の維持管理では、表層の改質アスファルトを適切に維持・更新することで、グースアスファルト混合物の保護・延命化を図る予防保全を行うこととしている。



図-1 舗装構成

Fig.1 Pavement composition

1.3 明石海峡大橋で発生している舗装変状

平成10年3月の供用後10年が経過したところから、舗装表面にひび割れ及びポットホールなどの変状が発生している。変状数の推移については、図-2に示すとおりで

あり、ポットホールは主に第一走行及び第二走行の輪荷重位置もしくは施工目地で発生している。また、ひび割れは橋全体の傾向として左右の輪荷重位置で縦断方向へ連続して生じているという特徴がある（写真-1）。

平成25年11月に下り線第一走行車線において実施された開削調査では、表層（改質アスファルト混合物）は経年劣化による針入度の低下が確認されたものの、基層（グースアスファルト混合物）は開削部分の目視において、強度に影響するひび割れ等の要因は確認されなかった。また、鋼床版と基層の界面は強固に付着しており、水分の存在やさびの発生は認められなかった。

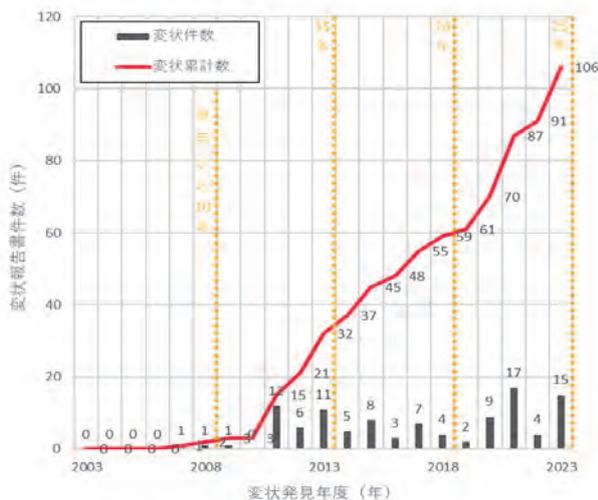


図-2 変状件数の推移

Fig.2 Changes in the number of cases of deterioration



写真-1 縦断方向ひび割れ

Photo 1 Longitudinal crack

1.4 明石海峡大橋の舗装補修

舗装のひび割れに対してはシール材による補修、ポットホールに対しては舗装の局部補修にて対応を行っていたが、表層の劣化が進行してきたため、平成29年からは切削オーバーレイ工による表層の補修を開始した。補修材料には、建設時の本四改質I型よりも疲労抵抗性に優れた改質AsIII型-WFを採用している。しかしながら、補

修後5年程度で一部の箇所において、ひび割れ及びポットホールが再発している（写真-2）。

そこで、更なる長寿命化を目指して、ひび割れの発生要因を推定し、その要因に応じた最適な補修方法（材料）を選定し、試験施工を実施することとした。



写真-2 再劣化箇所

Photo 2 Re-deterioration site

2. 明石海峡大橋で発生した舗装ひび割れの要因推定¹⁾

2.1 鋼床版構造と舗装ひび割れの関係

明石海峡大橋は縦リブ支間長が比較的短い鋼床版構造を採用していることから、鋼床版の変形に伴い基層の底面で発生する局所的な引張りずみに起因するボトムアップ型のひび割れや、繰返しの圧縮作用による表層からのトップダウン型のひび割れ²⁾は発生しにくいと考えられていた。

しかしながら、1.3で述べたとおり明石海峡大橋では舗装表面に縦断方向へ連続したひび割れが発生している。

このため、この縦断方向ひび割れが生じる要因について、ひび割れ状況の分析と鋼床版舗装3次元モデルのFEM解析という2つの手法から推定を行った。

2.2 ひび割れ状況の分析

明石海峡大橋に発生したひび割れについて、橋軸直角方向位置の分布特性を分析した。評価対象とした舗装延長に対するひび割れ長さの割合を「ひび割れ延長率」とし、第一走行車線にて撮影した路面画像を分析した。ひび割れは、シール材で補修されていたため、図-3のようにシール処理部の中心点をトレースして測長した。

ひび割れ延長率の橋軸直角方向分布を図-4に示す。

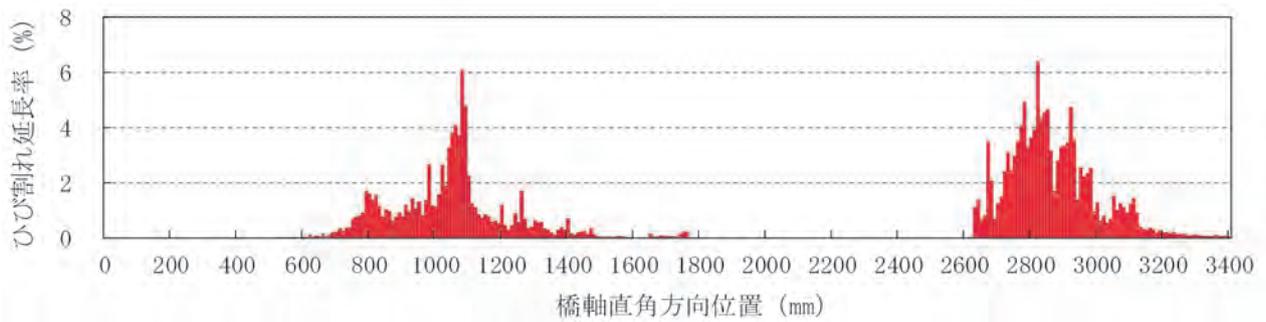


図-4 ひび割れ延長率の橋軸直角方向分布

Fig.4 Transverse distribution of crack extension ratio

左右の輪荷重間隔と等しい約1800 mm離れた位置で2つのピークが現れたことから、輪荷重の載荷位置を中心にひび割れが発生していることを確認した。

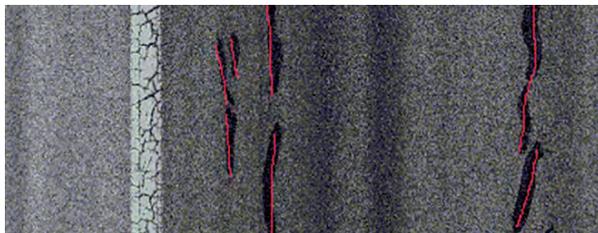


図-3 ひび割れ測長例

Fig.3 An example of crack length measurement

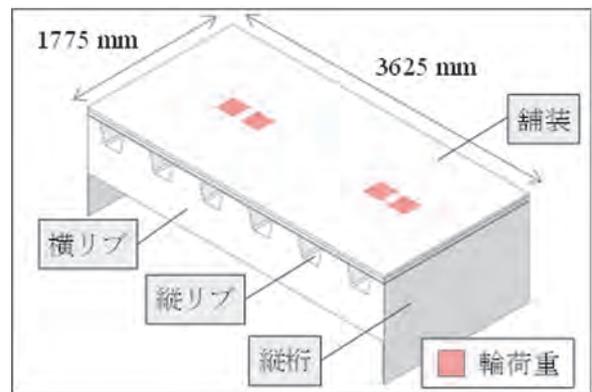


図-5 解析モデルの概要

Fig.5 Overview of FEM analysis model

2.3 FEMによるひずみ分布の解析

明石海峡大橋の床組断面図を参考に、図-5に示す3次元構造解析モデルを作成した。長大橋における鋼床版の支持構造は複雑であることから、本解析では床版構造と輪荷重との位置関係に着目し、縦桁及び横リブで区切られた範囲の版のみを対象とした。各部材を弾性体とみなしてソリッド要素で構築し、材料定数には表-1の値を用いた。

橋軸直角方向ひずみの解析結果を図-6に示す。5°C及び20°Cの場合は表層上面及び基層下面のどちらにおいてもひずみは微小であったが、60°Cの場合は輪荷重の位置を境として正負に変化するひずみ分布が得られた。また、60°Cで発生したひずみは、基層下面よりも表層上面の方が2倍以上大きな値を示した。すなわち、高温環境下では表層上面のひずみが卓越するため、明石海峡大橋ではボトムアップクラックよりもトップダウンクラックの方が発生しやすいと推定された。

2.4 車両の走行位置がひずみ分布に与える影響

車両の走行位置による影響を把握するために、輪荷重の位置を変えた解析を実施した。走行特性に関する報告⁹⁾を参考に、最頻位置から橋軸直角方向に400 mmずつ移動させて解析した。

表-1 解析に用いた材料定数

Table 1 Material constants used for the analysis

部材	弾性係数 (Mpa)			ポアソン比
	5°C	20°C	60°C	
表層	13,000	3,300	170	0.35
基層(レベリング層)	13,000	7,200	340	0.35
鋼床版	200,000			0.30

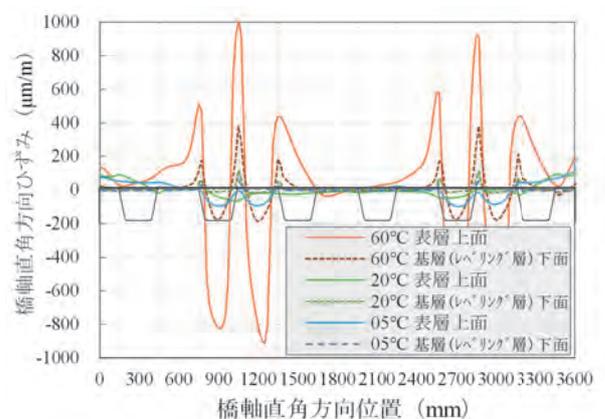


図-6 温度毎のひずみ分布

Fig.6 Strain distribution by temperature

60℃における表層上面のひずみ分布を重ねた結果を図-7に示す。各箇所で生じるひずみは、輪荷重の位置によって変化し、引張・圧縮の両方向に発生することが確認できた。

しかし、縦リブ接合部にあたる箇所では、走行位置によらず常に引張のみが発生し、圧縮に転じないことが明らかとなった。トップダウンクラックの要因となる表層上面の引張ひずみが卓越する箇所で、ヒーリング作用（自着作用）をもたらす圧縮ひずみが発生しないことから、縦リブ接合部上はひび割れが進展しやすいことが示唆された。

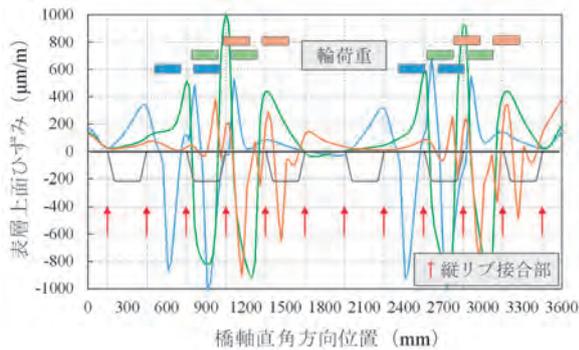


図-7 走行位置に対応したひずみ分布(60℃表層上面)

Fig.7 Strain distribution corresponding to the position of the wheel load (In 60 °C & on surface course)

2.5 引張ひずみの累算結果とひび割れ延長率との比較

図-7のFEM解析結果から橋軸直角方向位置ごとに引張ひずみによる疲労の度合を求め、ひび割れ延長率と比較した(図-8)。

疲労の度合は、ひずみ量と疲労は両対数平面上で直線関係にあることに基づいて、アスファルト混合物の代表的な疲労曲線⁵⁾を参考とし、まず各ひずみ分布について400μ引張ひずみを基準とした疲労の度合に換算した。その値に各走行位置の相対頻度を乗じた累算結果を「400μひずみ換算疲労度合」とした。

図-8に示すとおり、400μひずみ換算疲労度合が高い箇所と、ひび割れ延長率が特異的に高い箇所が一致した。

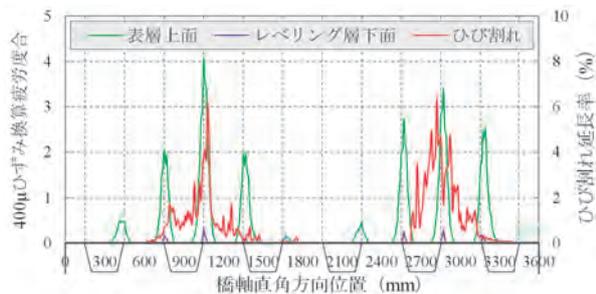


図-8 400μひずみ換算疲労度合とひび割れ延長率

Fig.8 400μ strain-converted fatigue degree and crack extension ratio

この結果から、明石海峡大橋で発生した舗装ひび割れの主要因は、表層上面に発生した引張ひずみに起因するトップダウンクラックである、と推定された。

3. ひび割れ要因に応じた舗装材料の選定

3.1 舗装材料の選定

舗装材料は、表層上面の引張ひずみへの対応として、以下に示す2つの観点から3種類を選定した(表-2)。

- ① 表層引張ひずみへの追従を目的とした高疲労抵抗舗装材料の選定によるひび割れ発生抑制(材料B・C)。
- ② 表層引張ひずみ量の抑制を目的とした高剛性舗装材料の選定によるひび割れ発生抑制(材料D)。

なお、今後の比較が可能なように、従来の材料である改質As III型-WF(材料A)を含めたすべての材料を同一本線上に施工する計画とした。

表-2 アスファルト材料の物性値

Table 2 Physical properties of asphalt

試験項目	材料名	選定品				舗装設計施工指針標準的性状(Ⅲ型-WF)
		従来品 材料A	材料B	材料C	材料D	
針入度(25℃)	1/10mm	72	88	86	46	40以上
軟化点	℃	96.0	87.5	86.5	98.0	70.0以上
タフネス(25℃)	N.m	24.9	-	-	28.6	16.0以上
フラス脆化点	℃	-24	-	-	-14	-12以下
G*/sinδ(70℃)	Pa	-	-	-	1582	-
G*/sinδ(25℃) × 10 ⁵	Pa	-	2.4	2.3	-	-
密度(15℃)	g/cm ³	1.028	1.029	1.029	1.028	-

3.2 アスファルト材料の物性値

選定したアスファルト材料の代表的な物性値は表-2に示すとおりである。針入度の物性値より、従来設計で使用している材料Aと比較して、材料B及び材料Cは柔らかく、材料Dは硬いアスファルト材料であると分かる。

3.3 混合物の物性値

各アスファルト材料を用いた混合物の物性値を表-3に示す。なお、混合物に使用する骨材の配合設計粒度は各アスファルト材料ともにNEXCO設計要領⁶⁾に示されている表層用混合物の配合設計標準粒度範囲(タイプA)で統一した。

従来使用している材料Aを用いた混合物Aと比較して、材料Bを用いた混合物B、及び材料Cを用いた混合物Cは、疲労抵抗性及びたわみ追従性に優れており、特に、疲労破壊回数は6倍以上の優位な差がみられることから、表層上面の繰返し引張ひずみに対するひび割れ発生抑制効果が期待される。また、材料Dを用いた混合物Dは、他の配合と比較して耐流動性に優れており、ホイールトラッキング試験後の変形量も0.4mm程度と極めて小さく

剛性が高いことから、舗装上面に生じる引張ひずみ量の低減が期待できる。

表-3 混合物の物性値

Table 3 Physical properties of asphalt mixture

試験項目	評価指標	単位	従来品	選定品			
			混合物A	混合物B	混合物C	混合物D	
ホイール トラッキング試験 (60°C)	動的安定度 (60°C) (γ) 内変形量 (mm)	回/mm	10500 (1.24)	7000 (1.29)	9000 (1.10)	21000 (0.42)	
曲げ疲労試験 (15°C, 900 μ , 5Hz)	疲労破壊回数 (15°C, 900 μ , 5Hz)	回	20,000	130,000	130,000	2,500	
曲げ試験 (-10°C)	曲げ強度 (-10°C)	N/mm ²	13.95	16.84	15.78	11.24	
	破断ひずみ (-10°C)	$\times 10^{-3}$	10.00	12.90	11.60	5.40	

4. 試験施工の実施及び実施後の路面性状

4.1 試験施工の実施

試験施工は、明石海峡大橋の上り線 第二走行車線で実施した (図-9)。施工は表層の切削オーバーレイとし、各混合物ともに1日で施工可能な1000m²程度とした。なお、施工機械編成は一般的な舗装工事と同様 (アスファルトフィニッシャー、マカダムローラ、タイヤローラ) である。

施工状況の一例を写真-3に示す。各混合物ともに、現場での温度管理や、敷きならし、転圧方法など、従来と同様の方法で施工が可能であることを確認した。なお、既設の表層切削後に基層 (グースアスファルト混合物) 表面の状態を確認したところ、ひびわれ等の損傷は発生していないことを確認した (写真-4)。このことから、当該箇所が発生した舗装のひび割れは、先述のとおり、基層下面から生じるボトムアップ型のひび割れではなく、縦リブ接合部直上に発生する表層上面の引張ひずみによる影響が大きいと考える。



写真-3 施工状況

Photo 3 Construction situation



写真-4 基層表面の確認状況

Photo 4 Checking the surface of base course

4.2 試験施工実施後の路面性状

実施6ヶ月後及び1年後に、路面性状測定車を用いて試験施工箇所の路面性状を確認した。ひび割れ率については全ての区間で0%という結果になっており、健全な路面状況を維持していることを確認した。わだち掘れ量の測定結果を図-10に示す。現時点では、施工後1年と期間が短いため、各配合による大きな違いは生じていない。

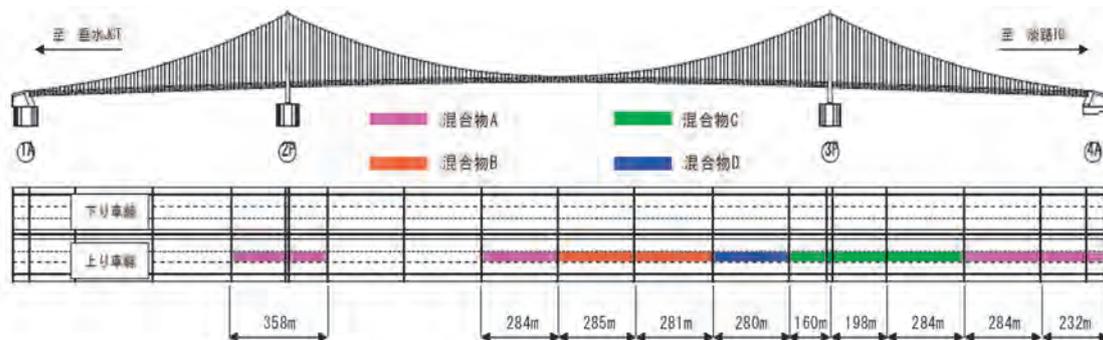


図-9 施工位置図 (明石海峡大橋 上り線 第二走行車線)

Fig.9 Work location (In Akashi-Kaikyo Bridge, In-bound line, Second lane)

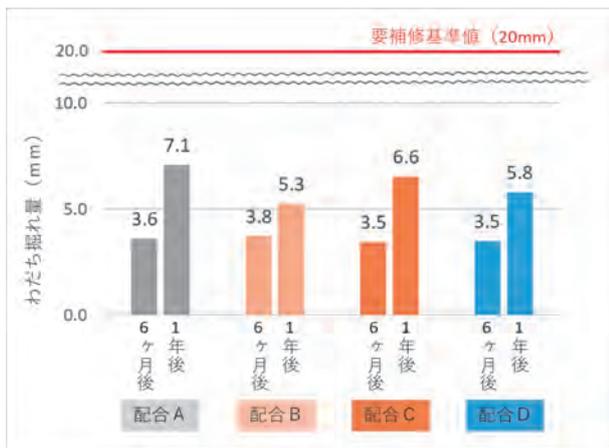


図-10 路面性状測定結果 (わだち掘れ)
Fig.10 Results of pavement characteristic (rut)

参考文献

- 1) 樋口ら, 明石海峡大橋に発生した舗装ひび割れの要因推定, 第34回日本道路会議 建設・施工技術 (舗装) 部門 3139, 2021.11
- 2) 内田ら, 首都圏における鋼床版舗装の破損状況, 第23回日本道路会議一般論文集, 1999.
- 3) 多田宏之, 鋼床版舗装の設計と施工, 鹿島出版会, 1990.
- 4) 松井繁之, 道路橋床版—設計・施工と維持管理—, 森北出版, 2007.
- 5) つくば舗装技術交流会, TPT Report No.4, 2014.
- 6) 設計要領第一集舗装, NEXCO総研, 2023.7

5. 舗装の長寿命化に伴うLCC低減効果の試算

従来材料である混合物Aによる補修サイクルを10年と仮定した場合, 今回比較を行った舗装材料が何年以上の補修サイクルになればLCCで有利になるかを, 切削オーバーレイ工の直接工事費により試算した (図-11)。

施工開始から100年後を基準として直接工事費の累計額を比較した場合, 混合物B・C・Dの補修サイクルが15年以上になれば, 混合物B・C・Dの方がLCCの面で優位になることを確認した。

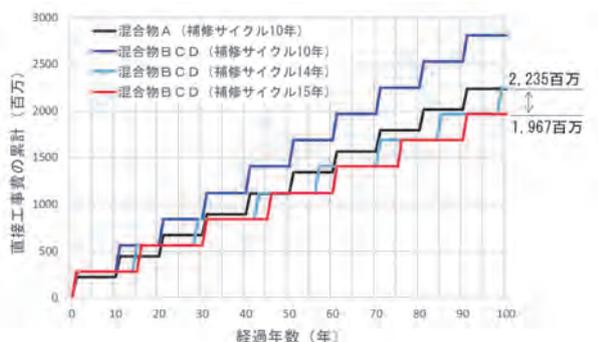


図-11 補修サイクルによるLCC比較
Fig.11 Comparison of LCC (Life cycle cost) by cycles of repair work

6. おわりに

明石海峡大橋の舗装に発生するひび割れは, 表層上面に発生する引張ひずみが主要因となるトップダウン型のひび割れであることを踏まえて, 優れた疲労抵抗性を有する舗装材料, 及び高剛性舗装材料を用いて長大橋舗装の長寿命化を目的とした試験施工を実施した。今後は, 試験施工実施後3年ごとに路面性状を確認し, 当該箇所でも適用した各混合物のひび割れ抑制効果について評価・検証する予定である。

コンゴ民主共和国マタディ橋の現況

Current Status of the Matadi Bridge in Democratic Republic of the Congo

横井 芳輝 Yoshiteru Yokoi 竹内 政彦 Masahiko Takeuchi 大浦 義司 Yoshiji Oura

長大橋・技術部
技術革新・アセットマネジメント課長代理
(兼) 保全部橋梁保全課長代理

執行役員

保全部設備課長代理
(兼) 長大橋・技術部
技術革新・アセットマネジメント課長代理

1. はじめに

コンゴ民主共和国に日本の無償資金協力で1983年に建設されたマタディ橋とそのアプローチ道路について、無償資金協力事業として大規模修繕を行う計画がある。

この事業実施に先立ち、独立行政法人国際協力機構（JICA）により協力準備調査業務が発注され、（株）オリエンタルコンサルタンツグローバル、大日本コンサルタント（株）（当時）、（株）アンジェロセックとともに共同事業体（JV）として受注（工期：令和4年4月13日から令和5年5月31日）した。この協力準備調査は、事業が無償資金協力案件として実施する妥当性があるかの検証、無償資金協力として実施する場合の大規模修繕に係る概略設計及び概略事業費の積算を行うことを目的としている。本州四国連絡高速道路（株）（以下、「本四高速」という）は、橋面舗装を除くマタディ橋本体の現況調査と必要な補修に係る概略設計を担当した。また、当該業務実施のため令和4年6月に本四高速の竹内、横井の2名が現地渡航し、橋梁調査を行った。

また、上述の準備調査後に日本政府によるプロジェクト実施の閣議決定を経て、両国政府にて国際約束（EN）が締結され、バナナ・キンシャサ交通公団（以下、「OEBK」という。）との契約により上記JVにて詳細設計を受注（工期：令和5年9月14日から令和6年7月31日）し、現在業務を遂行しているところである。この詳細設計では、概略設計に基づいた方針に従い、必要な調査検討を追加して、概略設計の精度を入札図書レベルまで仕上げることを目的としている。本四高速では概略設計に引き続き、マタディ橋本体の修繕に係る詳細設計を担当している。また、当該業務の実施のため令和5年9月に本四高速の大浦、横井の2名が現地渡航し、詳細設計のために必要な現地調査を行った。

本報告においては、コンゴ民主共和国及びマタディ橋の概要について述べるとともに、主に協力準備調査において本四高速で担当したマタディ橋本体の現地調査及び概略設計の概要について報告する。

2. コンゴ民主共和国の概要

コンゴ民主共和国（図-1）はアフリカの中央付近に位置し、西にわずかながら大西洋に面する内陸国で9か国と国境を接している。国土面積は約234万km²と広大で日本の約6倍であり、アフリカ大陸ではアルジェリアについて2番目の面積を擁する。また、人口は約8,956万人（2020年、世界銀行）、一人あたりGNIは544米ドル（2020年、世界銀行）、経済成長率は1.7%（2020年、世界銀行）の後発開発途上国である。

マタディ橋のある西部の気候はコンゴ川流域に位置し高温多湿の地域である。また、熱帯モンスーン気候に属しており、明確な雨季（10月～5月）と乾季（6月～9月）がある。年平均降水量は1,600mm～2,000mmである。また、年平均気温は24.1℃、年平均最高気温は29.7℃、年平均最低気温は18.5℃である。



図-1 位置図

Fig.1 Project site

世界有数の資源国であり、輸出の9割を石油や鉱物資源が占めている。東部地域では鉱物資源を巡る紛争などがあり、国内政情が不安定化する要因の一つとなっている。

インフラ面では、長年の政情不安や過去の内戦等を背景に、インフラの未整備及び老朽化が深刻な問題となっている。特に広大な国土を有する一方、都市間の輸送網は限定的であり、かつ施工後長年に亘り十分な改修がなされておらず、運輸インフラの整備・維持管理の不足が社会・経済発展における阻害要因となっている。

3. マタディ橋の概要

マタディ橋（写真-1）は、コンゴ民主共和国の西部の中央コンゴ州に位置する吊橋である。本橋はコンゴ民主共和国内において、首都であるキンシャサ以西地域でコンゴ川に架橋された唯一の橋梁であり、コンゴ民主共和国と日本との二国間関係の象徴となっている。本橋は輸入貨物の約4割が荷揚げされる国内最大のマタディ港、バナナ港、ボマ港と首都キンシャサをつなぐ陸運の要衝として重要な役割を担っている。

マタディ橋は、橋長722m、中央支間長520mの側径間に吊材のない3径間連続補剛トラス吊橋で、道路・鉄道併用橋として1979年に着工し、1983年に完成している。ただし、現時点において鉄道は未完成であり、道路部分のみの供用となっている。本四高速においても公団時代から技術者の派遣により建設、維持管理に関する技術協力を継続的に実施してきており、最近でもJICAの調査団の一員として現地渡航し調査を行ったり³⁴⁾、マタディ橋維持管理能力向上プロジェクトにおいて点検技術に関する現地OJT等を行う³⁵⁾などしている。

マタディ橋の維持管理は、OEBKが徴収した通行料金を原資として、塗装工事や点検車両の調達等を含む維持管理を自立的に行っている。過去には政情不安定のため日本からの技術支援が途絶えた時期もあったが、コンゴ人技術者は維持管理マニュアルと日本人から学んだ方法によりしっかりと維持管理がなされてきている。しかし、同橋梁は1983年の開通から約40年が経過しており、大規模補修である橋面舗装の打換が必要な状況にある。また、アプローチ道路では山側から流れ込む水の排水が適切になされておらず、路面に損傷が生じている。これらの損傷を放置した場合、更に損傷が進行し供用に影響を及ぼす恐れがある。しかし、政情不安や過去の内戦等により、経済開発やインフラセクター産業の成長が進まなかったことで、大規模補修の実施に必要な技術力や予算が確保できていない。これらを背景にコンゴ民主共和国政府は、令和3年9月にマタディ橋の舗装補修を日本政府に要請しており、これらを背景に、無償資金協力事業の準備調査等を行うこととなった。

4. マタディ橋の現況

4.1 調査概要

調査は、必要な補修方法を決定するために、橋梁全部材の状況について、徒歩及び点検用作業車により近接目視及び遠望目視を基本に実施した。調査を実施した部位を表-1に示す。

マタディ橋の日常的な維持管理は、日本の技術支援に基づきOEBKにより継続的に行われてきた³⁶⁾こともあり、全体的な健全度はおおむね良好であり、橋としての機能に支障が生じるような損傷は生じていないが、部分的な損傷・劣化は発生していることを確認した。これらについては、予防保全の観点から補修を行うことが望ましいと考え補修の概略設計を行った。主な部材について次項以降で取り上げて述べる。

4.2 主ケーブル、ケーブル送気乾燥システム

主ケーブルの塗装については、送気乾燥システム導入時（2017年、日本の支援により実施）に合わせて全面塗替えがなされており、上面から徒歩で確認する限りでは塗装表面に割れ等の変状は確認されなかった。

ケーブルバンド部等のシール部については、施工後5年程度であることからシール材の劣化は見られなかった。



写真-1 マタディ橋全景

Photo 1 Full view of matadi bridge

表-1 調査箇所一覧

Table 1 List of survey items

点検部位	部位詳細
補剛桁	鋼床版下面、上・下弦材、斜材、垂直材、横構、対傾構
主塔	塔頂、塔基部（内部、外面）、塔柱（内部、外面） 上・中間横桁（内部、外面）
主ケーブル	塗装、素線表面（送気・排気・モニタリングカバー部）
ケーブルバンド	バンド本体、シール部
ハンガーロープ	一般部、定着部
付属物	タワーリンク、エンドリンク、高欄、ウィンド杓 伸縮装置、橋梁排水施設
コンクリート構造物	アンカレイジ、主塔基礎
維持管理施設	補剛桁作業車（外面、内面）、ハンドロープ ケーブル作業車
ケーブル送気乾燥システム	除湿機、送気管、ケーブル気密性（塗装） ケーブル内温湿度
アンカレイジ除湿システム	除湿機、ダクト、アンカレイジ内温湿度

が、送気カバー部において、シール材の割れ及び空気漏れが確認された。送気カバーは乾燥空気をケーブル内に導入する部分であり比較的空気圧が高いため、シール割れや空気漏れが生じていると考えられる。送気カバー部で空気漏れが発生するとケーブル内に乾燥空気が十分に導入できないため、シール補修を行う必要があると判断した。また、空気漏れが発生していないケーブルバンド部等においても本州四国連絡橋で採用している弱点部の補強構造⁷⁾は採用されておらず、いずれ弱点部から空気漏れが発生することが予想されるため、改良構造でのシール施工を行う必要があると考えた。

送気・排気のモニタリングカバーの点検窓から素線の発せい状況を確認した結果、中央径間中央に設置している排気カバーの下面の素線表面に発せいを確認した(写真-2)。また、排気カバーの下面に滞水を確認した(写真-3(a))。この滞水によりケーブル内部は湿り気状態となり発せいに至ったと考えられる。なお、滞水が生じた原因としては、ケーブル表面やケーブルバンド部のシール部等からの雨水の侵入やケーブル内の空気中の水蒸気が朝方の気温の低下により結露するなど考えられるが、現時点では不明である。なお、現地調査時に排気カバーには水抜き孔が設置されているがボルトにより塞がれていたため、これを外して水は排出させた(写真-3(b))。また、今後は排気カバー部に滞水しないよう、当該ボルトについては外しておくようにOEBKには指導した。なお、約1年後に詳細設計業務にて現地調査を行った際には、排気カバー内の滞水はないことを確認している。

送気カバーに導入された乾燥空気が排気カバー部まで到達しているかを確認するため、排気カバーの排気管出口においてビニール袋を用いて空気の排気状況を確認した。ビニール袋のふくらみはほとんどみられず、空気量がわずかであることが分かった。送気カバー部の圧力に異常は確認できなかったことから、バンド部等のシール部等からの空気漏れ等による圧力損失や送・排気カバー部にクサビが設置されていないことにより円滑に空気が流入できていない等によりケーブル内に導入した乾燥空気が十分に到達していないことが考えられた。

次に、ケーブル内温湿度について、ポータブル温湿度計により計測を行った。計測は1P、2Pそれぞれのシステムの端末部となる中央径間中央の排気カバー一部、側径間のアンカレイジ部のモニタリングカバーにて行った。計測位置を図-2に、計測結果を表-2(a)に示す。ケーブル内の相対湿度は外気に対して低く、計測時点においてはおおむね60%Rhを下回っていることを確認した。一方で、相対湿度は温度により影響を受けることから、同表には、参考に計測した温湿度の空気に含まれる水蒸気が一定と仮定して温度が20°C、30°Cとした場合の相対湿度についても示している。これをみると、早朝の外気の温度が低い時間帯にはケーブル内部は高湿度となっているため、結露が生じる可能性があると考えらる。

また、主塔下部水平材内に設置されている除湿機の湿度を表-2(b)に示す。除湿前は主塔下部水平材内、除湿後は除湿機モニタに表示される値を示している。除湿

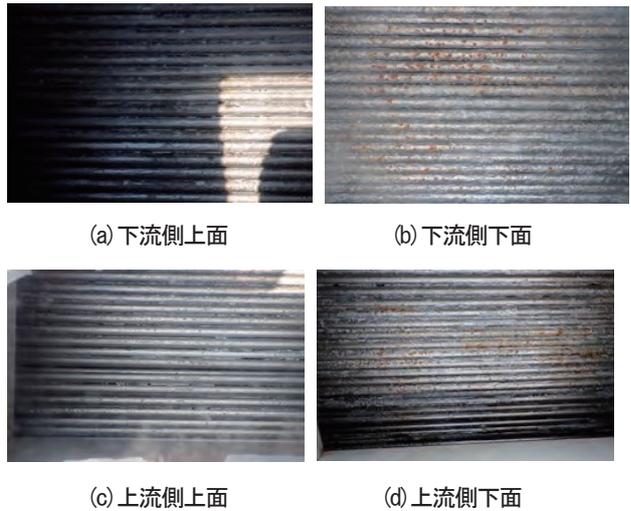


写真-2 排気カバー一部の素線の外観
Photo 2 Cabel strands (exhaust cover)



写真-3 排気カバー一部下面の滞水状況
Photo 3 Retained water inside bottom of the exhaust cover

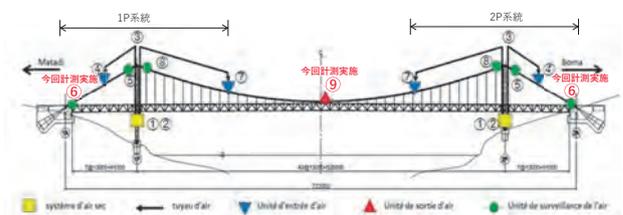


図-2 ケーブル内温湿度計測箇所

Fig.2 Measurement points of temperature and humidity

表-2 ケーブル内温湿度計測結果

Table 2 Temperature and humidity measurement results

(a) ケーブル内

【ケーブル】					外気				内部			
測定系統	No.	UP/DOWN	日付	時間	温度 (°C)	湿度 (%)	温度 (°C)	湿度 (%)	20°C換算 湿度 (%)	30°C換算 湿度 (%)	20°C換算 湿度 (%)	30°C換算 湿度 (%)
1P	⑥	UP	6月10日	15:57	31.5	51.3	35.4	40.4	94.4%	53.8%		
1P	⑥	DOWN	6月10日	15:51	31.8	53.3	31.9	46.7	90.7%	51.7%		
2P	⑥	UP	6月9日	14:47	30.3	52.0	44.2	36.3	131.9%	75.1%		
2P	⑥	DOWN	6月9日	15:10	30.8	57.2	41.4	36.3	114.9%	65.5%		
-	⑨	UP	6月9日	14:08	32.0	50.0	41.5	46.3	147.3%	84.0%		
-	⑨	DOWN	6月9日	11:54	28.6	63.4	31.6	38.2	73.0%	41.6%		
-	⑨	DOWN	6月10日	9:58	26.1	70.5	27.5	65.2	99.8%	56.9%		

(b) 除湿機

【除湿機】					水平材内				除湿機モニタ			
位置	No.	UP/DOWN	日付	時間	温度 (°C)	湿度 (%)	温度 (°C)	湿度 (%)	20°C換算 湿度 (%)	30°C換算 湿度 (%)	20°C換算 湿度 (%)	30°C換算 湿度 (%)
1P	①	-	6月9日	10:47	30.2	63.7	66.8	11.7	117.0%	66.7%		
2P	①	-	6月10日	11:07	29.5	63.8	68.2	10.6	112.3%	64.0%		

後の湿度は10%Rhと低いものの温度も高い。このため30°Cに換算した湿度を見ると、除湿前後での湿度に差がないことが確認できる。これは、マタディ橋で採用されている乾式除湿機は、温度が高いと除湿能力が低くなることから、気温が高い日中の時間帯は除湿能力が十分ではない可能性があると考えられる。

以上の調査結果から、送気乾燥システムの改良が必要であると判断をした。改良内容としては、高温時の除湿機の能力改善のため、プレクーラーを設置するとともに、中央径間部への送気カバーの追加と現送気カバーの排気カバーへの機能変更を行い、送気長を短縮する計画とした。加えて送排気カバー部におけるくさびの設置、塔頂サドル部のカバーの設置、温湿度計測用さや管の設置等も計画した。

4.3 補剛桁

補剛桁については、鋼床版裏面含めて点検作業車を用いて確認した。部分的に塗膜のふくれやはがれ、点さび等が生じているもののすぐに橋体の健全性に影響を及ぼすような大きな変状等は見られず、全体的には健全な状態であると考えた。一方で、主構トラス下弦材の継手部内面及び端横トラス下弦材に腐食の発生を確認した(写真-4(a), (b), (d))。

主構トラス下弦材の継手部内面の腐食はコブ状に生じていることから、継手部の母材間のすき間や上面ハンドホール(タップボルトで固定)(写真-4(c))のすき間等から雨水等が箱断面内に侵入し、腐食が生じていると考えられる。板厚減少量は測定できていないが、確認した範囲(1A~CL間)においては現時点での腐食程度は小さいと考えられる。また、マタディ橋は、鉄道荷重を考慮していることに加え、完成4車線で設計されており、現状においては2車線供用で運用されていることから断面には大きな余裕があり、直ちに橋体の健全性に影響を及ぼすものではないと考えられる。このため、箱部材内面に雨水等の水が侵入しないように、上面をシーリング材により防水し、これ以上の腐食を抑制する計画とした。なお、対象は主構トラス、主横トラスの下弦材の継手部全数とした。

端主横トラスは、雨水が伸縮装置部から供給される環境にあり、他の部位に比べて腐食が進行していると考えられる。このため、端主横トラスの塗替塗装を行う計画とした。

4.4 アンカレイジ

アンカレイジについては、2017年の送気乾燥システムの導入に合わせてアンカレイジスプレー室内の除湿システムも導入されている。合わせて、2A上流側の上屋天端には防水工の施工が実施されている(写真-5(a))。今回調査においては、スプレー室内の目視点検と温湿度調査を行った。

スプレー室内の素線の外観にはさび等の変状は見られ

ず、健全な状態であった(写真-5(b))。一方で、上屋の天端コンクリートにひび割れ及びエフロレッセンスが確認された(写真-5(c))。このため、天端コンクリート上面の防水工が未施工のままであると水の浸入による内部の湿度環境の悪化や浸入した水が直接ケーブル素線に当たることで腐食が促進されるなどが懸念される。このため、天端コンクリート上面の防水工未施工箇所については防水工を施工する計画とした。

スプレー室内の温湿度調査の結果については省略するが、スプレー室内の相対湿度はおおむね50%Rh以下であることを確認している。アンカレイジの除湿機はスプレー室の外に設置(写真-5(d))されており、湿式除湿機が採用されていた。これは常に温かい外気を取り込んで冷却により除湿処理をしていることから、常時フル稼働している状態であると考えられる。また、除湿機処理後の冷却乾燥された空気はスプレー室下部で流入していた。これは、一般に温かい空気は上部に、冷たい空気は



(a) 主構下弦材下面



(b) 主構下弦材内面のくさび



(c) 主構下弦材上面



(d) 端横トラス下弦材のくさび

写真-4 補剛トラスの状況

Photo 4 Stiffening trusses



(a) 天端防水工 (2A上屋)



(b) スプレー室内の素線



(c) スプレー室の天端



(d) アンカレイジ除湿機

写真-5 アンカレイジの状況

Photo 5 Anchorage

下部にたまりやすいことから、空気の対流が生じにくいと考えられる。このため、スプレー室内に対流が生じさせるとともにスプレー室内の空気を取り込んで循環させるような改良を行うことで経済運転とスプレー室内の温湿度の改善が図られると考えられる。この改良は配管の改良のみの作業でありOEBKによる直営でも実施できると考え、OEBKにて実施するよう現地にて提案している。

4.5 伸縮装置

伸縮装置については、路面から確認できる外観は腐食等の変状もなく健全な状態であった。しかし、下面から近接した結果、櫛部材を受けるビームが橋軸方向にずれていることを確認した。緩衝材のネオプレングム（建設時は厚さ20mm）が劣化により薄くなり、ビームが移動しやすくなっていることが原因と考えられる。本橋の伸縮装置は供用から40年が経過していること、部品交換等の対応が難しいことから、伸縮装置を更新する計画とした。



(a) 伸縮装置上面 (b) ビームのずれ

写真-6 伸縮装置の状況

Photo 6 Expansion joint

4.6 塗装

建設時の塗装仕様について、マタディ橋工事誌⁸⁾ (P236~P237) を基に整理したものを表-3 (a) に示す。なお、各層の膜厚については把握できていない。また、表-3 (b) にOEBKが2009年に実施した塗装塗替え実施時の塗装仕様を示す。なお、表中の膜厚は、OEBKへのヒアリングにより把握した使用塗料を基に、製品カタログに記載されている膜厚を記載した。

塗装部材について、各部材の点検時に目視による塗膜劣化状況や塗膜変状の発生状況を確認することに加えて、補剛桁（床組含む）、主塔、ハンガーロープにおいて塗膜厚及び付着力の調査を行った。

塗膜調査は、図-3に示す位置で行った。なお、ハンガーロープ以外の調査箇所については、今後、経時的な追跡調査が可能となるよう定点調査枠を設けた（写真-7(a)）。

付着力は、定点調査枠の近傍にてガムテープ試験により行った（写真-7(b)）。なお、塗膜の層間での付着の異常は生じていないことを確認した。

塗膜厚は電磁膜厚計により全膜厚の測定を行った。定点調査枠は20cm四方の枠とし、10cm間隔で区切った1

区画（10cm×10cm）ごとに3点測定を行い、その平均値で評価した。塗膜厚調査の結果を表-4に示す。建設時の塗膜厚については不明であるものの、日本における重防食塗装の乾燥膜厚が250 μ mであることを考えると、膜厚は十分に存在しており、建設時の塗膜がある程度残存し

表-3 マタディ橋の塗装仕様

Table 3 Paint specifications

(a) 建設時

	1層	2層	3層	4層	5層	6層
補剛桁、主塔外面	亜酸化鉛錆止めペイント（工場）	亜酸化鉛錆止めペイント（工場）	フェノールMIO（工場）	フェノールMIO（工場）	フェノールMIO（現場）	
補剛桁内面	タールエポキシ（工場）	タールエポキシ（工場）				
主塔内面	タールエポキシ（工場）	タールエポキシ（工場）	アルミニウムペイント（工場）			
継手部	厚膜型ジンクリッチプライマー（工場）	塩酸カルシウム（現場）	塩酸カルシウム（現場）	フェノールMIO（現場）	フェノールMIO（現場）	フェノールMIO（現場）
鋼床版下面	有機ジンクリッチプライマー（工場）	厚膜型エポキシMIO（工場）	フェノールMIO（現場）			
鋼床版上面	無機ジンクリッチプライマー					

(b) 塗替塗装時

	素地調整	1層	2層
補修塗装	金ブラシ、サンドペーパーによるケレン	インターシール670HS（2液性エポキシ樹脂塗料）	インターガード400（エポキシ樹脂塗料）125~150 μ m



図-3 塗膜調査位置

Fig.2 Location of paint survey



(a) 塗膜厚調査状況 (b) ガムテープ試験状況

写真-7 塗膜調査状況

Photo 7 Paint survey

表-4 塗膜調査結果

Table 4 Results of paint survey

測定No.	部位	上下	測定面	径間	格点No.	計測日時	電磁膜厚計による膜厚
①	補剛桁 下弦材	上流側	西面	1P-2P	8	2022/6/17	621
②	補剛桁 下弦材	下流側	東面	1P-2P	8	2022/6/17	557
③	補剛桁 下弦材	上流側	西面	1P-2P	25-26	2022/6/17	343
④	補剛桁 下弦材	下流側	東面	1P-2P	25-26	2022/6/17	300
⑤	補剛桁 下弦材	上流側	西面	2P-2A	1	2022/6/17	583
⑥	補剛桁 下弦材	下流側	東面	2P-2A	1	2022/6/17	844
⑦	主塔 塔柱	上流側	西面	1P	8	2022/6/16	426
⑧	主塔 塔柱	下流側	東面	1P	8	2022/6/16	409
⑨	主塔 塔柱	上流側	西面	2P	48	2022/6/16	639
⑩	主塔 塔柱	下流側	東面	2P	48	2022/6/16	509
⑪	床組 横桁ウェブ	中央	ボマ側	1A-1P	7	2022/6/7	519
⑫	床組 鋼床版Uリブ	中央	下流側	1P-2P	26	2022/6/8	467
⑬	床組 横桁ウェブ	中央	マタディ側	2P-2A	55	2022/6/8	404
参考計測	床組 鋼床版Uリブ	中央	下流側	1A-1P	7	2022/6/7	374
参考計測	床組 横桁ウェブ	中央	—	1A-1P	6-7	2022/6/7	378
参考計測	床組 鋼床版Uリブ	中央	下流側	2P-2A	55	2022/6/8	372
⑭	ハンガーロープ	上流側	西面	1P-2P	18	2022/6/11	644
⑮	ハンガーロープ	下流側	東面	1P-2P	18	2022/6/11	591

単位： μ m

た状態で、塗替え塗装により塗膜が追加されていると想定される。このため、塗膜の外観による点検を継続し、下塗りや中塗りの赤色が透けて見え始めたら塗替塗装を行うことでよいと考える。なお、数年後以降に現地渡航の機会を得た方に、追跡調査が実施され、経時的な傾向が得られることを期待している。

4.7 その他

上述の他、主塔、ハンガーロープ、タワーリンク、エンドリンク、維持管理設備等についても目視調査を行ったが補修が必要となる変状等は確認されなかった。

5. おわりに

本稿では、マタディ橋の補修に係る無償資金協力事業の準備調査等において、現地渡航により調査したマタディ橋の現況等について紹介した。なお、本報告の詳細等については、準備調査報告書⁹⁾を参考にされたい。

なお、今回の現地調査にあたっては、安全面から技術面まで含めて社内からの協力をはじめ、JICA本部、JICAコンゴ民主共和国事務所、(株)オリエンタルコンサルタンツグローバル、大日本ダイヤコンサルタント(株)、(株)アンジェロセックの技術者の皆様、OEBKの皆様にご多大なご支援をいただきました。深くお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 独立行政法人国際協力機構ガバナンス・平和構築部：無償資金協力に係る報告書等作成のためのガイドライン，2022.6
- 2) 外務省HP：https://www.mofa.go.jp/mofaj/press/release/press7_000117.html
- 3) 荻原勝也：海外報告(コンゴマタディ橋の現況)，本四技報，Vol.35，No.115，pp.27-30，2010.9
- 4) 貴志友基，藤田憲二：コンゴ民主共和国，本四技報，Vol.42，No.130，pp.83-86，2018.3
- 5) 竹内政彦：マタディ橋維持管理能力向上プロジェクト，本四技報，Vol.38，No.121，pp.24-28，2013.9
- 6) マタディ橋を考える会：マタディ橋ものがたり-日本の技術でつくられ、コンゴ人に守られる吊橋，2021.2
- 7) 貴志友基，朝倉義博：200年供用を支える吊橋ケーブル送気乾燥システム，橋梁と基礎，Vol.51，pp.42-45，2017.11
- 8) (社)土木学会：マタディ橋工事誌，1986.6
- 9) (独)国際協力機構(JICA)，(株)オリエンタルコンサルタンツグローバル，本州四国連絡高速道路(株)他：コンゴ民主共和国マタディ橋及びアプローチ道路補修計画準備調査報告書，2023.5

IABSE シンポジウムイスタンブール 2023

IABSE Symposium Istanbul 2023

2023年4月26日～28日の日程で、IABSE2023がイスタンブールにて開催されました。

IABSE (International Association for Bridge and Structural Engineering) は、土木構造物の計画、設計、建設、維持管理及び補修にかかわる様々な技術・研究成果を発信するための場として、スイス民法により1929年に設立された国際学会であり、現在、世界の100数カ国から約4,100の会員(個人・団体)が加入しており、大学機関から建設コンサルタントまで多岐にわたる方々がIABSEが主催する会議に参加しています。本シンポジウムのテーマは「長大橋」であり、長大橋の設計や工事実績、維持管理や点検技術、補修・改良・耐震補強の工法、デジタル技術の活用についての発表が行われました。今回のテーマは、2022年3月18日に開通した中央支間長が世界最長となる吊橋、1915チャナッカレ橋の開通にちなんでいます。会議では中国の世界最長の吊橋・斜張橋の建設、ノルウェーでの超長大スパン吊橋構想、カスピ海横断構想、アイリッシュ海横断構想のように今後の長大橋建設計画について情報発信がありました。また、トルコの1915チャナッカレ橋や中国の張靖婁長江大橋などの最新の橋梁から古い橋梁の維持管理や建設中に崩壊した橋梁の原因分析まで幅広い内容で各国から発表がありました。

本四高速からは長大橋・技術部の花井グループリーダーが「ケーブル送気乾燥システム導入後、20年経過した吊橋の維持管理」について、しまなみ尾道管理センターの道路維持(兼)橋梁維持グループの下瀬が「多々羅大橋の耐震補強に用いた国内最大規模のダンパー性能試験」について発表を行いました。

最終日には1915チャナッカレ橋のテクニカルツアーが行われました。管制室にて構造健全性モニタリングシステム(SHMS)の説明があり、その中では、ITVカメラ、ケーブル送気乾燥システム、動態観測システムを一括管理していました。また、船舶で桁下からの橋梁を視察しました。トルコの長大橋はオスマンガズィ橋や7月15日殉教者の橋、ヤウズ・スルタン・セリム橋など、橋梁名を変えてまで歴史的背景について世界へ発信しているように思いました。1915チャナッカレ橋もその1つで主塔塔頂部には、ガリポリの戦いで使われた砲弾の形が刻まれています。

世界各国で長大橋の支間長をめぐるには挑戦が続いており、一方で維持管理の重要性も感じることができた会議となりました。



写真-1 IABSE 会長の基調講演

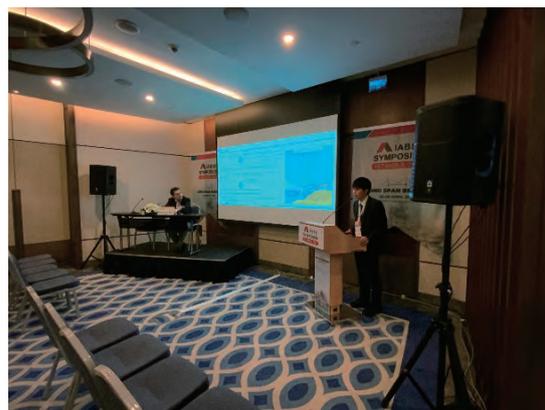


写真-2 本四高速の発表



写真-3 テクニカルツアー



写真-4 1915チャナッカレ橋 管制室

(鳴門管理センター 保全課 木内 愛理)

グレートベルト・リンク開通25周年行事及び技術交流

Great Belt Link 25th Anniversary Event and Technical Exchange

2023年6月10日～18日の日程で、デンマーク国内の長大橋「グレートベルト・リンク」を管理するストアベルト社からの招待状に基づき、同橋開通25周年の式典へ参加するとともに、デンマーク国内における長大橋や建設現場の視察、及び管理会社との維持管理に関する意見交換を実施しました。

グレートベルト・リンクは、首都コペンハーゲンの位置する東のシェラン島と、西のフエン島を結ぶ全長18kmの交通路です。海峡上に位置するスプロウエ島を境に東橋と西橋に分けられ、2橋1トンネルでデンマーク交通の大動脈を担っています。1998年、明石海峡大橋と同年に開通を迎え、両橋間にて姉妹橋提携に関する覚書が締結されています。

かつてグレートベルト・リンクが開通した頃は不毛の土地であったスプロウエ島は、今や希少な動植物が集う、緑豊かで美しい場所となっています。同橋の開通25周年を祝い、現地スプロウエ島では島内の生物多様性をより向上させるためのアイデアを競うイベントが2日間にわたって開催され、我々は招待を受けて表彰式に参加させていただきました（写真-1）。研究機関や専門家、NGOといった様々なフィールドから約30人の参加者が集まる中で、デンマーク工科大学など6者からなるチームが優勝し、提案されたアイデアは今後の事業に活用される予定とのことです。

イベント後にはストアベルト社との技術交流として、意見交換ならびにグレートベルト・リンクの現地視察の場を設けていただきました。意見交換（写真-2）では長大橋の維持管理にまつわる課題から最新の知見に至るまで、幅広い情報共有ができたと考えています。本四高速からは、事前に依頼されていた吊橋ハンガーロープの概要とその制振対策をはじめ、動態観測や点検手法など、吊橋の維持管理に関する話題を中心に説明を行いました。

現地視察では東橋（吊橋）のアンカレイジ、塔頂、補剛桁内等をご案内いただきました。過去に強風に伴う交通事故が多発していたらしく、風況改善の目的でアンカレイジ及び主塔付近に遮風壁が設置されていたり（写真-3）、トラックの道路防護柵への衝突による火災事故の発生を機としてメインケーブルに防火カバーが取り付けられている（写真-4）等、現地での条件・課題に合わせた種々の対策状況を確認することができました。

グレートベルト・リンクをはじめ、今回視察を行った長大橋では、ドローンを用いた点検やセンサによるモニタリングといったデジタルライゼーションが進んでいる印象で、そのような最新の知見に触れることが出来たという意味でも、有意義な機会であったと考えています。

（保全部 橋梁保全課 綾城威歩生）



写真-1 25周年イベント（表彰式）



写真-2 意見交換



写真-3 主塔付近における遮風壁



写真-4 メインケーブル防火カバー

第11回ニューヨーク市橋梁会議

11th New York City Bridge Conference

第11回ニューヨーク市橋梁会議（New York City Bridge Conference. 以下「NYCBC」という。）が2023年8月21日～22日の日程で、アメリカのニューヨーク市で開催されました。NYCBCは橋梁に特化した国際会議であり、設計、施工及び維持管理など幅広い内容に関して、各国の橋梁技術者（管理者、設計者、研究者及び施工者）による論文発表及び賛助企業によるブース出展等が行われます。おおむね2年に1度の割合で開催されています。

今年は2編の基調講演と93編の論文発表が2日間にわたって行われました。論文発表がまとめられた全18セッションには、それぞれ橋梁点検をはじめとした幅広いセッションテーマが設けられており、各セッションでは参加者による質疑・議論も行われました。

本四高速からは耐震解析及び補強のセッションに、長大橋・技術部の総括・耐震・耐風グループの坂本サブリーダーが「世界最大級の道鉄併用橋である瀬戸大橋の耐震補強（Seismic retrofit of the Seto-Ohashi Bridges which is one of the largest bridges in the world as a bridge for highway and railway）」と題して、瀬戸大橋を構成する吊橋、斜張橋及びトラス橋に対して実施した耐震補強について発表を行いました。

会議の翌日には、長大橋管理者に限定したワークショップが行われました。世界中の10の機関が参加し、各機関より橋梁の建設及び維持管理に関する取組について説明があり、意見交換が行われました。本四高速からは、長大橋・技術部の総括・耐震・耐風グループの花井リーダーより「近赤外線による残存塗膜厚評価手法の開発（Deterioration Detection of Heavy-Duty Anticorrosion Coating using Near-Infrared Hyperspectral Imaging）」、坂本サブリーダーより「斜張橋3橋の耐震設計の特徴の比較（Comparison of Seismic Design for Various Scales of Cable-Stayed Bridges）」と題して既設橋についての話題提供を行いました。

会議参加に併せて、長大橋4橋（ベンジャミン・フランクリン橋、ベラザノ・ナロウズ橋、ブルックリン橋及びマキノ橋）を視察しました。ベンジャミン・フランクリン橋では、5つのリハビリテーションプログラムの一部としてケーブル送気システム導入工事が行われていました。マキノ橋では、橋梁の視察だけでなく、現地管理者とマキノ橋の床版の交換実績・計画や本四連絡橋のケーブル送気システムを中心とした吊橋の維持管理についての意見交換も行いました。

（しまなみ尾道管理センター 計画課 岡村英史）



写真-1 本四高速からの発表

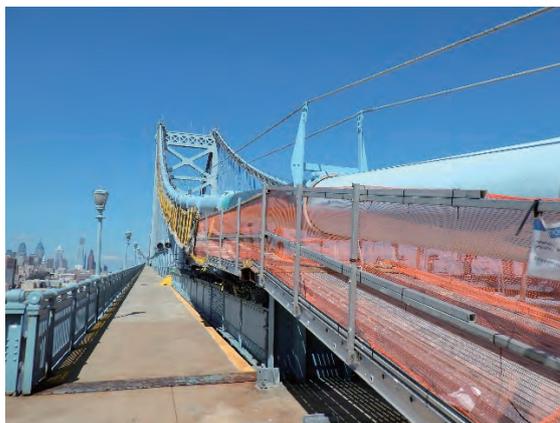


写真-2 ベンジャミン・フランクリン橋



写真-3 マキノ橋

PIARC第27回世界道路会議プラハ大会

PIARC 27th World Road Congress 2023 in Prague

世界道路協会（PIARC：Permanent International Association of Road Congress）は、道路の建設、改良、維持、利用の促進や世界全体の道路技術・道路交通政策の向上を目的として1909年に設立された国際機関であり、現在、127カ国が加盟しています。PIARCでは、道路分野の最も権威ある国際フォーラムとして、4年に1度、世界道路会議を開催しており、世界各国の道路行政関係者、土木技術者等が一堂に会し、道路及び道路交通に関する新しい知識・技術の紹介や各国が抱える課題などの技術交流を行っています。

第27回世界道路会議は、2023年10月2日から6日にかけて、チェコ共和国プラハで開催され、120カ国から約6,000名（日本からは約300名）が参加しました。会議では、大臣セッション、基調講演、戦略方向性セッション、技術セッション、ワークショップ、ポスターセッションなど、60を超えるセッションが開催されました。このうち、技術セッション（橋梁）では、今井常務取締役が座長を務め、4年間の活動報告や橋梁のリハビリテーションなどについて活発な議論が行われました（写真-1）。また、同セッション内で遠藤部長（経営計画部）がパネルディスカッションに参加し、気候変動による橋梁への影響と対応について活発な議論が行われました（写真-2）。

過積載による落橋の軽減に関するワークショップでは、パネリストとして今井常務取締役が出席し、「本四道路での過積載車による疲労損傷と過積載車両の取り締まり（OVERLOADED VEHICLES, FATIGUE DAMAGE AND ENFORCEMENT ON THE HONSHU SHIKOKU BRIDGE EXPRESSWAY IN JAPAN）」について口頭発表しました。

ポスターセッションでは、金田代理（企画部企画課）が「瀬戸大橋の桁橋の耐震補強（SEISMIC RETROFIT OF A SIMPLY SUPPORTED GIRDER IN SETO-OHASHI BRIDGES）」について説明及び質疑対応を行いました（写真-3）。

さらに、技術展示では、日本パビリオンとして官民38団体が出展し、当社も「長大橋の維持管理技術（Advanced Technology of Honshu-Shikoku Bridges）」と題したパネル展示、動画放映を行い、情報発信を行いました（写真-4）。

次回の世界道路会議は2027年にカナダのバンクーバーで開催される予定です。

（長大橋・技術部 総括・耐震・耐風 G 坂本佳也）



写真-1 技術セッション（橋梁）活動報告



写真-2 パネルディスカッション



写真-3 ポスターセッション

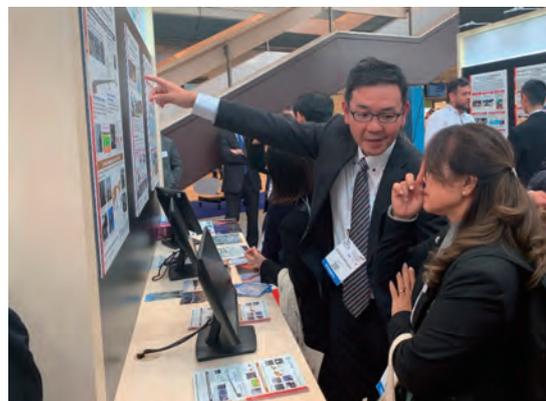


写真-4 技術展示

国際吊構造橋梁管理者協会 アジア地域ワークショップ（神戸）

ICSBOA Asia Regional Workshop in Kobe

国際吊構造橋梁管理者協会（ICSBOA; International Cable Supported Bridge Operators Association）のアジア地域ワークショップが、本四高速の主催により、神戸にて、2023年11月20日～11月21日の日程で開催されました（写真-1）。このワークショップは、2年ごとに開催されている国際吊構造管理者会議の中間の年に、地域ごと（北米・欧州・アジア）に開催されています。

今回は、ICSBOAの会員である日本、中国、韓国の長大橋管理者に加え、ベトナム、ラオス、カンボジア、インドネシアの政府機関にも参加を呼びかけ、計11機関から27名（オンライン参加を含む）が参加しました。ワークショップにおいては、各機関が管理する吊構造橋梁等に関する技術的課題や技術開発の現況等について発表が行われ、情報交換を実施しました。また、本四高速より、初めて参加いただいたアジアの長大橋管理者に向け、ICSBOAの概要とともに、2024年10月に、米国ニューヨーク州にて開催される予定の第12回国際吊構造橋梁管理者会議について紹介しました。

中国からは4名の方が神戸に来られ、東南大学のZhen Sun氏より、AI技術と動態観測システムを連携させることによる疲労損傷度予測技術の検討状況について発表があり、AIへの教育方法など、質疑が行われました。

韓国からはソウル大学のHo-Kyung Kim氏がオンライン参加され、強風時における大型車横転の原因等を検証した風洞試験の結果や、横転対策のための速度規制の考え方や対策に関する検討などが報告されました。また、AIを用いた技術開発の現状に関する発表に対し、意見交換が実施されました。

ベトナムから道路総局のTo Nam Toan氏、ラオスから公共事業運輸省のNilundone Phavongsa氏、カンボジアから公共事業運輸省のChanthy Sochiva氏とRattanak Heng氏の2名がそれぞれ対面参加され、それぞれ、斜張橋、エクストラードロード橋やPC箱桁橋などの長大橋の維持管理状況、技術的課題等に関する発表が行われました。また、インドネシアからは公共事業住宅省の方4名がオンライン参加されました。

ベトナム政府は、現在、斜張橋16橋を管理し、構造的健全性モニタリングシステムの配置、稼働状況や、斜張橋のケーブルダンパーや伸縮装置の損傷等について紹介され、損傷対策などに関する意見交換が行われました。

ラオスでは、日本のODA資金協力により建設されたエクストラードロード橋（ラオスー日本友好橋）やPC箱桁橋において、PC箱桁橋に発生したひび割れの状況、箱桁橋中央ヒンジ部における損傷と挙動、現在の対応状況について報告が行われました。

カンボジア公共事業運輸省のRattanak Heng氏より、政府が管理する代表的な橋梁20橋のうち、日本のODA資金協力により建設されたつばさ橋が唯一の吊構造橋梁（斜張橋）であること、同国においてもPC箱桁橋の想定外の挙動とそれらの対応状況に関して発表があり、意見交換が行われました。

本四高速からは、「本四連絡橋の技術開発」、「電気防食工法によるコンクリート床版の補修と維持管理」、「長大橋主塔点検ロボットの開発」の3題について話題提供を行い、合計10編の技術発表とともに意見交換が行われました。

翌日11月21日には、テクニカルツアーとして、明石海峡大橋をご覧いただき（写真-2）、建設時における技術開発、維持管理用の設備や維持管理の現況と技術開発について紹介を行いました。

なお、今回のワークショップにおいて情報収集した各国の長大橋に関する技術情報や技術的課題については、JICA本部・現地事務所・長期派遣専門家と連携・調整しながら進めている技術支援を念頭においた現地フォローアップや案件形成に活用することとしています。今後も国際会議やワークショップへの参加においては、情報発信とともに、情報収集に努める所存です。



写真-1 ワークショップ



写真-2 明石海峡大橋塔頂にて

（経営計画部経営計画課 池田秀継）

アジア・オーストラレーシア道路会議 2023（インドネシア）

Asia Australasia Road Conference 2023 (Indonesia)

アジア・オーストラレーシア道路技術協会（Road Engineering Association of Asia and Australasia：以下「REAAA」という。）の50周年記念大会として、アジア・オーストラレーシア道路会議（Asia Australasia Road Conference：以下「AARC」という。）2023が、2023年8月23日から27日までインドネシア・ラブハンバジョで開催されました。本会議では、道路技術セッション、ビジネスフォーラム及び展示会等が開催されました。また、本会議にあわせて、第120回評議員会、第24回若手技術者・専門家（Young Engineers and Professionals：以下「YEP」という。）会議等も開催されました。AARCは4年に1回開催され、評議員会とYEP会議は1年に2回開催されます。

本州四国連絡高速道路（株）からは、長大橋・技術部 総括・耐震・耐風グループ 小林弘昌がAARC道路技術セッションの発表者及びYEP委員として参加しました。

AARC道路技術セッションでは、「大鳴門橋1A上屋道路桁の電気防食」について小林から発表を行いました。同セッションでは他に、インドネシア公共事業・国民住宅省から、過積載車両によるインドネシア国道の橋梁への影響評価について発表があり、許容できる超過荷重の設定や制度の見直し等の提案がありました。

YEP会議には、日本、インドネシア、オーストラリア、韓国、シンガポール、台湾、フィリピンから32名が参加しました。各国の若手の道路専門家の交流を目的として、最近の取組や課題などが報告されました。日本からは2023年5月に神戸で開催されたPIARCワークショップへの参加等のYEP国内活動紹介について報告を行いました。また、テクニカルプレゼンテーションでは、IoTをテーマにオーストラリアからビッグデータ・センサーを活用した舗装ヘルスマonitoringについての発表等がありました。

各国の活動や話題に関して活発に意見交換をすることができ、大変有意義な会議参加になりました。

（長大橋・技術部 総括・耐震・耐風グループ 小林弘昌）



写真-1 YEP会議

保有特許一覧

国内特許

2024. 1. 31 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)
4252982	橋梁及び橋梁の構築方法	本州四国連絡高速道路(株)、国立研究開発法人土木研究所、日立造船(株)、川田工業(株)、一般財団法人土木研究センター、JFEエンジニアリング(株)、エム・エムブリッジ(株)、清水建設(株)、一般財団法人橋梁調査会、(株)三井E&Sマシナリー
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

特許番号	特許名	特許権者
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
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)

■ 国際特許

2024. 1. 31 時点

特許番号	特許名	特許権者
US7743444B2 米国	CABLE STAYED SUSPENSION BRIDGE MAKING COMBINED USE OF ONE-BOX AND TWO-BOX GIRDERS	本州四国連絡高速道路(株)、日立造船(株)
US11346011B2 米国	METHOD FOR PREVENTING CORRSION 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 (23.05~23.12)

題 名	著 者	雑誌名等	巻 号	年 月	頁
CIMモデルを活用した維持管理の高度化	服部浩太郎 杉田彩 津田久嗣 杉山剛史 山口和範	IHIインフラシステム技報		202211	9
本四高速におけるSA・PAを拠点とした地域連携の推進 インフラ経営のリーディングカンパニーを目指して	吉川佳那	道路 2022.12		202212	4
長大橋管理者の技術交流 第11回国際吊構造橋梁管理者会議開催報告	西谷雅弘 池田秀継	道路 2023.01		202301	2
重防食塗装の塗膜消耗特性	本郷誠人 山根彰 米澤篤志 後藤稜平	Structure Painting 2023 Vol. 51	51	202309	7
令和の橋を考える	山口隆司 板垣定範 刑部清次 奥村学 坂本佳也 田畑晶子 青木康素 竹田達也 松村泰行 松下裕明	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会		202309	3
長大橋維持管理業務の効率化・高度化を目的としたBIM/CIM導入検討	杉山剛史 横井芳輝 平松直人 大倉章弘	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会		202309	3
橋梁解析モデルの活用による長大橋の効率的な維持管理を見据えたBIM/CIMモデルの構築	杉山剛史 平松直人 宮田秀太 徳橋亮治 人見淳	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会		202309	3
サブスペース法による固有値解析結果の信頼性評価に関する一検討	徳橋亮治 吉澤努 坂井公俊 月岡桂吾 山下大輝 坂本佳也 西谷雅弘 金田泰明	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会		202309	3
絶縁仕様を施した異種金属接触継手の実環境における耐久性の検証	大西達也 澤田守 志村保美 藤城忠朗	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会		202309	3
片側施工高力ボルトのバルブスリーブの腐食形状が残存軸力に及ぼす影響	横井芳輝 杉山剛史 平松直人 小川和也 大井隆生	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会		202309	3
直角方向に剛性の不足するエンドポストを有する鋼上路ローゼ橋の耐震補強設計例	鎌田啓市 田中剛 金田崇男	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会		202309	3
耐震補強におけるメナーゼ支承交換の施工報告	是川悠介 溝上善昭	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会		202309	3
ハイパースペクトルロックイン法による重防食塗装の劣化検知の高精度化	阪上隆英 小川裕樹 塩澤大輝 坂田巧 森本龍人 春名進佑 杉山剛史 横井芳輝 平松直人	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会		202309	3

題名	著者	雑誌名等	巻	号	年月	頁
近赤外線ハイパースペクトルイメージングによる重防食塗装の劣化検知	塩澤大輝 阪上隆英 小川裕樹 坂田巧 森本龍人 春名進佑 杉山剛史 横井芳輝 平松直人	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会			202309	3
工程短縮を目指した高架橋耐震補強工事の施工実績	藤中知幸 上林義則 水野浩尚 小清水哲郎 福岡美瑛	土木学会全国大会 第78回年次学術講演会			202309	3
特殊橋の性能診断型点検の実施に向けた取り組み	坂本佳也 香川耀平	第35回日本道路会議 論文集			202311	2
鋼床版縦行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	第35回日本道路会議 論文集			202311	2
長大橋舗装の長寿命化に向けた取り組み事例	武田拓実 大爺健司 樋口勇輝 小幡範 齋藤佑太 小澤伸也	第35回日本道路会議 論文集			202311	2
片側施工高力ボルトのバルブスリーブの腐食が残存軸力に及ぼす影響	横井芳輝 杉山剛史 平松直人 小川和也 大井隆生	第35回日本道路会議 論文集			202311	2
長大橋梁点検補修用作業車の給電方式等改良の取組	石原蒼也 松尾俊宏 谷拓樹	第35回日本道路会議 論文集			202311	2
道路橋の上部構造における荷重経路の代替性や補完性の評価方法	木下貴史 白戸真大 坂本佳也	第35回日本道路会議 論文集			202311	2
本四連絡橋における大型伸縮装置の維持管理	綾城威歩生 北村岳伸 本郷誠人	第35回日本道路会議 論文集			202311	2

※本四技報，技術発表会は除外。

本四技報編集委員会・幹事会名簿(五十音順) 令和6年2月29日現在

委員長	森山彰	幹事長	花井拓
委員	朝倉義博	幹事	池田秀繼
	白田幸生		白田幸生
	小河正次		大浦義司
	北川竜二		大串弘幸
	楠原栄樹		大爺健司
	今野新巳		門田整樹
	佐伯成巳		楠原栄樹
	杉山剛士		河野晴彦
	田村正治		小西浩之
	土谷政拓		坂本祐一
	花井憲二		杉本口廣
	藤田憲一		田中輝仁
	前島和範		堤田憲二
	山口茂樹		藤山和範

本四技報 第141号

発行 令和6年3月22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/ハルゾ配合率70%再生紙を使用

