

長大橋梁の点検における技術開発

TECHNOLOGY DEVELOPMENT FOR INSPECTION OF LONG-SPAN BRIDGES

廣田昭次* , 臼田幸生**
Shoji HIROTA and Yukio USUDA

ABSTRACT The Honshu-Shikoku Bridge Expressway Company Limited has been maintaining 17 long-span bridges. In order to steadily carry out maintenance based on preventive maintenance, we are working on technical development from various points of view, such as more efficient inspection and maintenance of long-span bridges, and improvement and advancement of safety.

KEYWORDS : 点検, 鋼構造

Inspection, steel structures

1. まえがき

本州四国連絡高速道路は、昭和 54 年の大三島橋関連区間の部分供用に始まり現在 173km の道路が供用されているが、その中に含まれる 17 の長大橋は、短いもので約 20 年、長いものでは約 40 年にわたり供用され続けている。これまで橋体そのものの安全性が損なわれるような事象は生じていないが、予防保全を基軸とした維持管理を着実に実施していくために、点検・維持管理手法のさらなる効率化や安全性の向上・高度化など様々な観点から技術開発に取り組んでいるところである。

本稿では、本州四国連絡高速道路においてこれまで行われてきた長大橋の点検に関する技術開発について代表的なものを記述する。

2. 点検における技術開発

効率的な保全のためには、計画に基づく定期的な点検・調査により構造物の状態を的確に把握した上で、健全性評価と将来の劣化予測を行い、将来予測に基づき最適な時期に補修や対策を実施することが必要である。また、点検・調査での継続的なデータ蓄積により予測結果の検証と予測手法の改善を行い、次の点検・補修計画に活用することとしている。収集するデータの深化と効率化のために行っている長大橋の点検に関する技術開発について代表的なものをいくつか記述する。

3. 長大橋主塔点検ロボットの開発

3.1 概要

本州四国連絡橋には、明石海峡大橋や多々羅大橋等の海峡を横断する世界有数の規模を誇る吊橋や斜張橋が15橋ある。長大橋の主塔は最大高さが300m近くに達する高層の鋼構造物であり、主塔表面の点検及び補修には高所部への接近が必要となる。一般に既存の主塔表面への接近手段としては、その高さに応じた高所作業車、仮設足場、ゴンドラ、ロープアクセス等を用いることが考えられる。しかし、これらの接近手段は安全性、使用性、経済性が課題となっており、特に点検作業ではより安全で効率的な接近手段が求められていることから、磁石車輪により鋼製の塔壁面に吸着し、任意の位置に

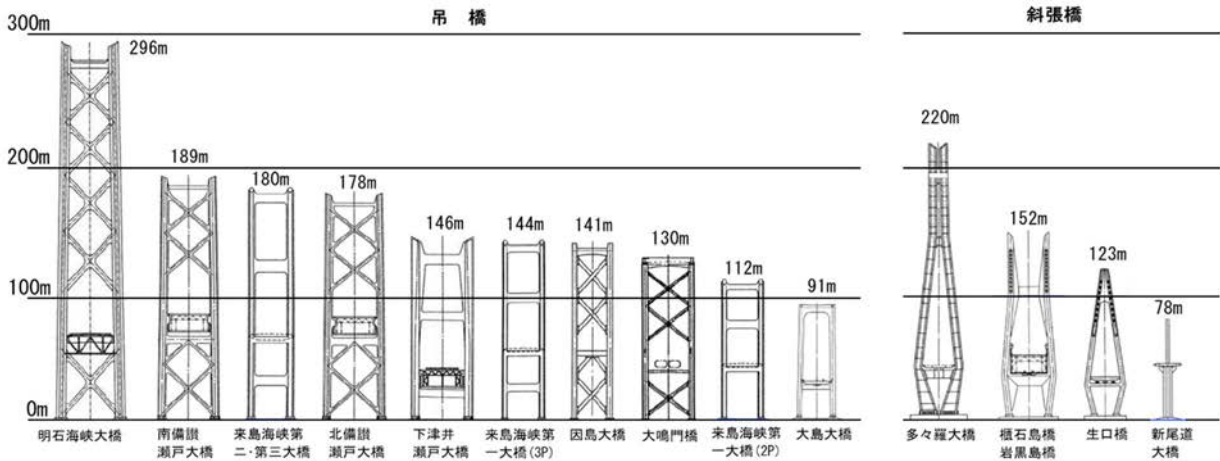
* 本州四国連絡高速道路(株) 保全部 次長 (〒651-0088 兵庫県神戸市中央区小野柄通 4-1-22)

** 本州四国連絡高速道路(株) 保全部 橋梁保全課長 (同上)

走行できる小型、軽量の主塔点検ロボットを開発した。

3.2 主塔点検ロボット開発の背景

吊橋等の長大橋の主塔は高層の鋼構造物であり、その表面は防錆対策と景観の観点から塗装している。一般に塗装は、紫外線や風雨等により徐々に白亜化等の劣化が進むため、一定間隔で塗替塗装が必要となる。また、塗装は構造物の部位（ボルトや添接部等）や環境等により局部的に劣化が進行する場合があります、腐食等の変状箇所を放置すると保全費用の高騰を招く恐れがある。



図－1 本州四国連絡橋の長大橋主塔の高さ及び形状

したがって、最適な主塔の保全の実施には、点検により塗膜等の変状や劣化状況を部位ごとに把握し、これらの点検結果から全体的な健全度の評価を行い、補修塗装や塗替塗装の範囲と最適な時期について保全計画を立案し、PDCAのサイクルで実施していくことが重要である。

以上のように長大橋の主塔の保全では点検が重要となるが、本州四国連絡橋の主塔（図－1）の多くは高さが100mを越えており、特に明石海峡大橋では主塔高さが約300mとなるため、主塔の高所に接近して容易に点検を行うことが難しい状況である。

3.3 主塔高所部点検の課題と対応

主塔高所部の外壁面の変状を発見するには、主塔高所に接近して観察や撮影ができる接近手段が必要となるが、次のような課題がある。

- 1) 主塔高所への接近手段としては一般にゴンドラが考えられるが、高所になるほど風が強くなり安全性と作業効率を確保するための対策が必要となる。
- 2) ゴンドラを使用する場合には、点検の都度資機材を現地に搬入し架設する必要があり、これら準備作業に多大な労力と費用を要する。

また上記以外の方法として、主塔基部等から高画質カメラで撮影する方法があるが、本手法には次のような課題がある。

- 1) 本州四国連絡橋の主塔基礎の多くは海上に設置されており、基礎上から主塔高所部を撮影する場合には仰角が大きくなり被写体の形状がゆがんで劣化部等の範囲、形状、状態等の詳細な変状の把握がしにくくなる。
- 2) 主塔高所部の撮影を船舶により実施した場合には、仰角が小さくなるが被写体との距離が大きくなるほか、船の揺動によりピントが合わず撮影が難しい。

図－2に明石海峡大橋を高画質カメラで撮影する場合の主塔撮影部位と撮影位置の関係を示すが、塔柱外側面（東西面）では撮影位置が主塔基礎となり道路面高さより上部は写真撮影が難しい。

以上の背景から、主塔高所部の点検を安全で効率的に実施する手法の一つとして、主塔基礎部から遠隔操作で変状の発見と詳細な観察や撮影による記録ができる主塔点検ロボットの開発を実施した。

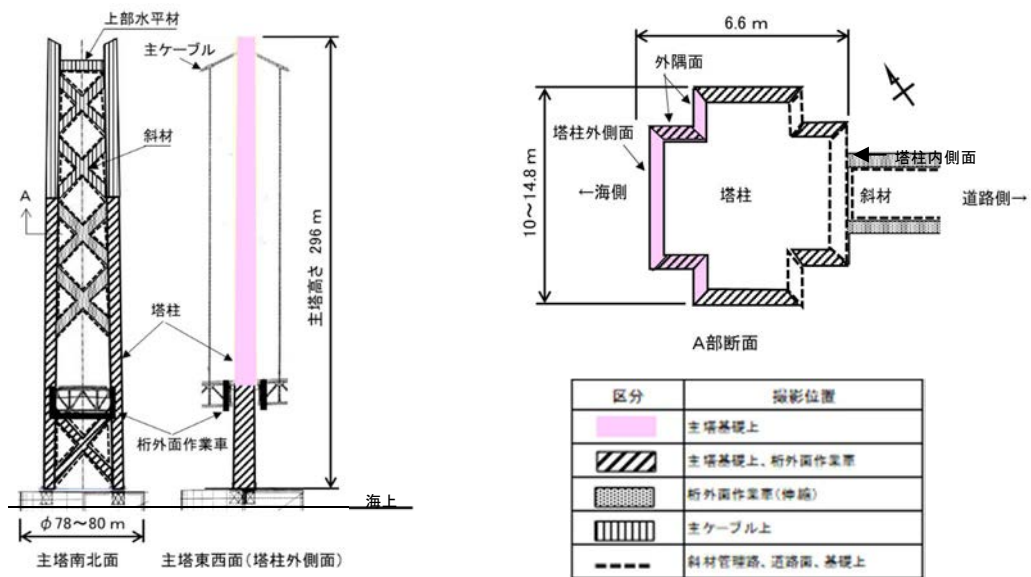


図-2 明石海峡大橋主塔の撮影部位と撮影位置

3.4 主塔点検ロボットの基本条件

主塔点検における課題を解決するため、主塔点検ロボットの基本条件を次のように設定した。

(1) 対象橋梁形式と点検対象

主塔点検ロボット開発にあたり対象となる橋梁形式は、吊橋の主塔（鉛直）を対象に進めるものとし、試験運用により性能を確認する実橋は、主塔高さが最大で吊橋におけるモデルケースとなる明石海峡大橋を選定した。また、点検範囲は、高画質カメラでの撮影が難しい主塔の塔柱外側面及び外隅面（図-2 着色部）を対象とした。

なお、その他の箇所については、次の理由から明石海峡大橋で得られた知見を基に段階的に適用拡大を図るものとした。

- a) 斜張橋のように形状が屈曲している主塔では解決すべき課題が多いこと。
- b) 塔柱外側面及び外隅面以外の壁面については、高画質カメラによる確認が可能で課題も少ないこと。
- c) 路面上の壁面については、路面防護工等の安全対策の検討が必要なこと。

(2) 点検目的と確認対象の整理

主塔点検ロボットの確認対象は、橋梁点検要領を基に主塔壁面の塗膜、シール類、高力ボルトの外観とした。

(3) 主塔点検ロボットの基本構想

1) 点検器具

点検器具は、主塔点検ロボットを移動しながら確認対象である塗膜、シール類、高力ボルトの外観を遠隔で観察でき写真等に記録できる撮影装置とした。

2) 移動機構

主塔壁面の移動機構は、点検器具である撮影装置を、安全に任意の位置へ移動でき、かつ主塔壁面と撮影装置の焦点距離を一定に保つために滑らかに移動できるものとして、車輪による壁面走行装置を採用するものとした。

3) 操作位置

主塔点検ロボットの操作と画像の確認を行う位置は、作業スペースと主塔点検ロボットの視認性が最低限確保できる主塔基礎上とした。

4) 点検手法

点検手法は、点検範囲が高さ約 300m、幅約 12m と広いため、作業効率の向上を目的に走行しながら広い範囲を遠隔で確認できるものとした。

(4) 壁面走行装置の条件

1) 段差乗り越え性能の確保

明石海峡大橋の主塔壁面(写真-1)は、全体的にはほぼ平坦であるが、部材の接合に添接板が約 10m ごとに配置されている。更に仮設足場や架設クレーン等の設置跡には化粧ボルトとして M24 トルシアボルトが施工されている。主塔点検ロボットは、この添接板等による段差高さ 15mm~43mm を乗り越えられる性能を有するものとした。

2) 位置保持性能の確保

主塔点検ロボットは、風により容易に滑動することがないように位置を保持する能力を有するものとした。更に将来的には斜張橋の主塔等の屈曲した形状にも対応することが求められる。

3) 壁面走行装置の必要能力

上記を踏まえ、主塔点検ロボットの壁面走行装置に必要な能力を整理すると次のようになる。

- ① 壁面の任意の位置へ移動するため、走行(昇降)、横行、斜行ができること。
- ② 最大段差 43mm を乗り越えられること
- ③ 段差等による離壁及び風による滑動等を防ぐために必要な位置保持性能を有すること。
- ④ 効率的な点検のために、主塔高さ約 300m を 1 日で 1 往復以上できること。

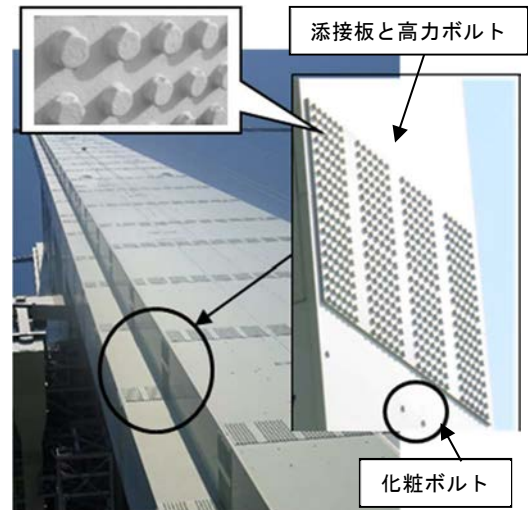


写真-1 主塔の撮影部位と位置

(5) 運搬・設置に係る条件

主塔点検ロボットは、分割して主塔内を人力で容易に運搬できる寸法及び質量とするため、その質量は、組立質量で 100kg 以下、分割時の単体質量で 30kg 以下を目標とした。

(6) 安全対策に関する条件

主塔点検ロボットには、万一主塔壁面から剥がれた場合に落下しないための落下防止対策を行うものとした。更に主塔点検ロボットが壁面途中で故障等により停止した場合には、安全に回収できる非常時の主塔点検ロボット回収機構を具備するものとした。

3.5 主塔点検ロボットの計画

基本条件を満足する主塔点検ロボットの実現に向けて課題の抽出、対策の検討及び評価を行い、主塔点検ロボットの構造、機能等の仕様及び運用方法等を決定した。

(1) 壁面走行装置

1) 壁面での位置保持

壁面で任意の位置の移動し、また滑動を防ぐためには、落下に対する反力(摩擦力)と離壁を防ぐ反力を得るための、壁面への吸着力又は押付力が必要になる。この力を得る方法としては磁力吸着、真空吸着、送風による押付等が考案されている。

本州四国連絡高速道路(株)では、対象壁面が鋼製であることに着目し、永久磁石による磁石車輪(図-3)を開発している。

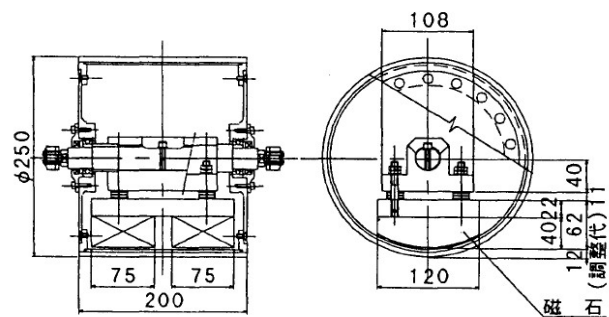


図-3 磁石車輪一般図(標準仕様)

磁石車輪は、車輪内部に強力な磁力を持つ希土類ネオジウム磁石を内蔵し、鋼壁面に強力に吸着して走行可能で、添接板等の段差の乗り越し性能も有するもので負傾斜にも対応できる。

この磁石車輪を主塔点検ロボットに採用することにより、必要な反力を確保することとした。

2) 駆動方式

壁面走行装置の駆動方式には、巻上機によるロープけん引式と磁石車輪に駆動力を持たず自走式が考えられる。今回は、横行等の機能が必要であり磁石車輪に駆動機構とステリング機構を組み込んだ自走式を採用した。また、必要な走行速度は最大10m/分とした。これは主塔高さ約300mを単純に1時間で往復できるように設定したものである。

(2) 点検器具（撮影装置）

撮影装置は、塔柱外側面と外隅面を効率的に観察・撮影ができる必要がある。このため壁面との距離を確保し広い範囲を撮影するものとし、主塔点検ロボット後部にカメラポールを設置し、その先端に可視光カメラを設置することとした。また、塔柱外側面から外隅面を撮影できるようにカメラポールは90°横に張り出しできる構造とし、主塔点検ロボットが塔柱外側面側端部を走行することで外隅面の点検も可能とした。

更にカメラポールには、可視光カメラによる外観だけでなく温度差により塗膜の浮き等を観察できる赤外線カメラを取り付けられる構造とした。

なお、カメラの選定にあたっては、効率よく点検作業が行えるように、広角で高解像度であること、最大300mの距離を安定して画像の伝送が可能なこと、カメラポールは小型・軽量であることが求められた。これらの、条件を満足しできるだけ安価に調達できるものとして、市販のネットワークカメラを選定した。

(3) 運搬・設置方法の課題と対応

主塔点検ロボットは、使用性を向上するために主塔内を人力で運搬可能な質量と大きさにする必要がある。このため、主塔点検ロボットをアルミニウム合金製としたほか、装置単位でユニット化し、分割して運搬できる構造とする等小型・軽量化への様々な検討を行った。以下にその取組を示す。

1) 磁石車輪の小型化検討

磁石車輪を用いた壁面走行装置を設計するにあたり、車輪の小型化が課題となった。これまで採用されている標準的な磁石車輪は外径250mm、吸着力2.45kNであり、その質量は約20kg/輪となる。主塔点検ロボットに、必要な最小輪数3輪でも60kg/台になり目標としている組立質量の半分以上を占めるものとなる。よって、磁石車輪の小型・軽量化のため次のような検討を行った。

① 磁石車輪の数と配置

磁石車輪の数と配置は、段差乗り越え等に必要な吸着力と車体の安定性を得られる最小輪数とし、上輪2輪、下輪1輪の3輪とした。

② 必要吸着力の照査

主塔点検ロボットには、自重の他に保安ロープや通信ケーブル等に風荷重が作用するため、磁石車輪はこれらの力に対しても滑動や離壁を起こさない摩擦力と吸着力を確保するよう照査した。

③ 段差乗り越え性能の確保

主塔点検ロボットの駆動方式は、横行等が必要であるため自走式となる。しかし、磁石車輪の小径化により上昇時の段差乗り越え時にスリップし、車輪の駆動力だけでは段差を乗り越えられない。この対策として、安全対策で使用する保安ロープの巻取装置を活用し、常に一定の張力を与えておき段差乗り越え時に補助させることで必要な段差乗り越え性能を確保した。

以上のような検討を行い、段差乗り越え性能等の必要な性能を確保しつつ外径170mm、質量11.3kgと小型・軽量となる磁石車輪が製作可能との結果を得た。表-1に標準的な磁石車輪と今回小型・軽量化した磁石車輪の比較を示す。

2) 駆動方式による影響の照査

主塔点検ロボットが壁面を昇降するための駆動方式には、前述のとおり自走式とロープ牽引式が考えられる。主塔点検ロボットの小型・軽量化に対し、自走式では駆動装置等で質量が増加する。

また、ロープ牽引式ではロープが太径化し風荷重の増加や移動の自由度が制限される。このため両方式を比較検討した結果、駆動方式の違いによる主塔点検ロボット本体の質量差がわずかであったため、走行性能に自由度のある自走式を基本に設計した。

3) 給電方法等による影響と対策

① 給電方式

主塔点検ロボットに必要な電力を供給する給電方式は、一般に有線による方法が長時間安定した電力を確保できるが、配線延長が300m以上となり太径化して風荷重の影響が大きくなる。このため、主塔点検ロボットの給電方式は、本体にリチウムイオン電池を搭載する方式とした。なお、電池容量は、明石海峡大橋主塔においても1.5往復程度の連続走行が可能となるように選定した。

② 信号・画像の伝送方法

主塔の壁面上の主塔点検ロボットと基礎上の運転操作装置間の通信と画像伝送は、長い通信距離でも安定した通信が可能となるように光ケーブルによる有線式とした。

③ 通信ケーブル等の影響の低減

ア) 通信ケーブルを主塔点検ロボット下部に取り付け、安全対策で使用する保安ロープを主塔点検ロボット上部に取り付けるレイアウトとした。

イ) 更に通信ケーブルと保安ロープの単位質量を同程度とすることで、通信ケーブルと保安ロープの重量が釣合う構造(図-4)とし主塔点検ロボットの駆動力の増加を抑えた。

4) 小型・軽量化検討のまとめ

以上の検討から、1ユニットの最大質量は1人でも運搬可能な30kg程度以下にでき、組立質量も80kg程度となる見通しを得た。また、寸法についても主塔に搬入可能な大きさとなり、1ユニットの最大寸法は幅0.58m×長さ約0.86m×高さ0.26mとなった。

(4) 安全対策等

主塔点検ロボットの安全対策として、落下防止対策、非常時の主塔点検ロボット回収機構、遠隔操作方法と位置把握対策を実施した。以下に詳細を述べる。

1) 落下防止対策

落下防止対策として、主塔点検ロボット上部に保安ロープを取り付ける構造としたが、保安ロープには一定の張力を加えていないと落下時に自由落下となる時間が発生し衝撃力が增大する。また、ロープのたわみ等で主塔部材への引っ掛かりやロープ巻取り時の乱巻きの発生が懸念された。このため保安ロープには、主塔点検ロボットの昇降動作と同期して巻き取り・繰り出しができ、常に一定の張力(0.5kN)を保持する巻取装置(ウインチ)を設けるものとした。

また、巻取装置と主塔点検ロボットの走行を同期させる必要があること及び前述の通信ケーブルとの釣合い効果が必要なことから、塔頂部に滑車を設置し巻取装置は基礎

表-1 主塔点検ロボット用磁石車輪の諸元

項目	標準仕様	今回仕様
車輪径 (mm)	250	170
車輪幅 (mm)	200	150
標準吸着力 (kN/輪)	2.45	1.47
質量 (kg/輪)	20	11.3
自走機能の有無	なし	あり

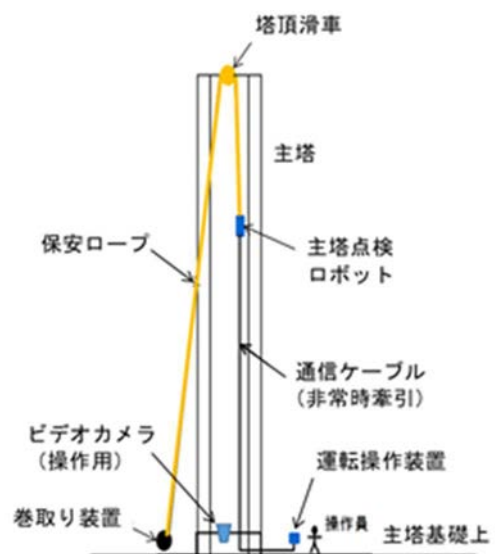


図-4 配置イメージ

上に設置する配置とした（図－4）。

2) 非常時の主塔点検ロボット回収機構

非常時の主塔点検ロボット回収機構として、主塔点検ロボットの下部に取り付けた通信ケーブルはアラミド繊維ロープ入りとし、かつ巻取装置にはキャプスタンを併設した。これにより、主塔点検ロボットが故障等により走行できなくなった場合等の非常時には、通信ケーブルの巻き取りと保安ロープの繰り出しを同時に行い、下方にけん引することで主塔点検ロボットを主塔基部で回収できる。

このとき支障となるものが位置保持のために使用する磁石車輪のブレーキである。このため主塔点検ロボットのブレーキは、一般に使用されるネガティブブレーキ（電源遮断時にバネ力等で作動するブレーキ）ではなく、駆動に使用するサーボモーターのサーボロック機能（停止時に電氣的にモーター軸を動かなくする機能）をブレーキとすることとし、非常時には主塔点検ロボットの電源を切ってブレーキを解除できるようにした。

3) 遠隔操作方法と位置把握対策

主塔点検ロボットに取り付けられた点検用カメラと主塔基礎上から目視によりロボット周囲の状況を把握することは、仰角も大きく、距離もあるため双眼鏡を使用する等しても苦渋作業となる。

このため、主塔基礎上の高所にある主塔点検ロボットの位置把握を行うビデオカメラ（操作用）を設置し、その映像により状況把握を行うこととした（図－4）。

また、変状箇所の記録にも必要な主塔点検ロボットの詳細な位置は、主塔ブロックの段数を基本に、主塔点検ロボットの走行・横行方向の車輪回転数からブロックごとの添接板等からの移動距離を算出して把握するものとした（写真－2）。



写真－2 主塔壁面の目視状況

3.6 主塔点検ロボットの製作と室内試験

(1) 主塔点検ロボットの製作仕様

以上の検討結果を基に主塔点検ロボットを製作した。製作した主塔点検ロボットの仕様を表－2に全体構成を図－5に示す。

(2) 主塔点検ロボットの室内試験

工場において模擬壁面を使用して、制作した主塔点検ロボットの車輪単体の吸着力、巻取装置の巻取性能等の基本性能を確認した。

室内試験の結果は次のとおりであり、主塔点検ロボットが当初設定した基本条件の機能・性能を確保していることを確認した。

1) 単体性能の確認

① 磁石車輪単体の吸着力試験

主塔壁面の平坦部や添接板において磁石車輪単体で所定の吸着力等を確認（写真－3、表－3）した結果、設計値と実測値の差は基準の±10%程度であった。

表－2 主塔点検ロボットの仕様

項目	仕様
走行方式	車輪駆動+牽引式（横行は車輪駆動のみ）
寸法	幅0.58m×長さ0.86m×高さ0.42m
材質	7系ニッケル合金
質量	83kg（単体訳32kg以下に分割）
走行速度	1～10m/分
位置保持	磁石車輪3輪（上2輪+下1輪：合計吸着力3.9kN）
作業条件	設計風速：移動時5m/秒、停止時10m/秒 段差性能：最大43mm（添接板最大厚22mm） 雨天等：原則使用禁止
電源	リチウム電池
通信方式	インターネット（主塔点検ロボット操作盤間は光通信）
点検器具	可視光カメラ、赤外線カメラ

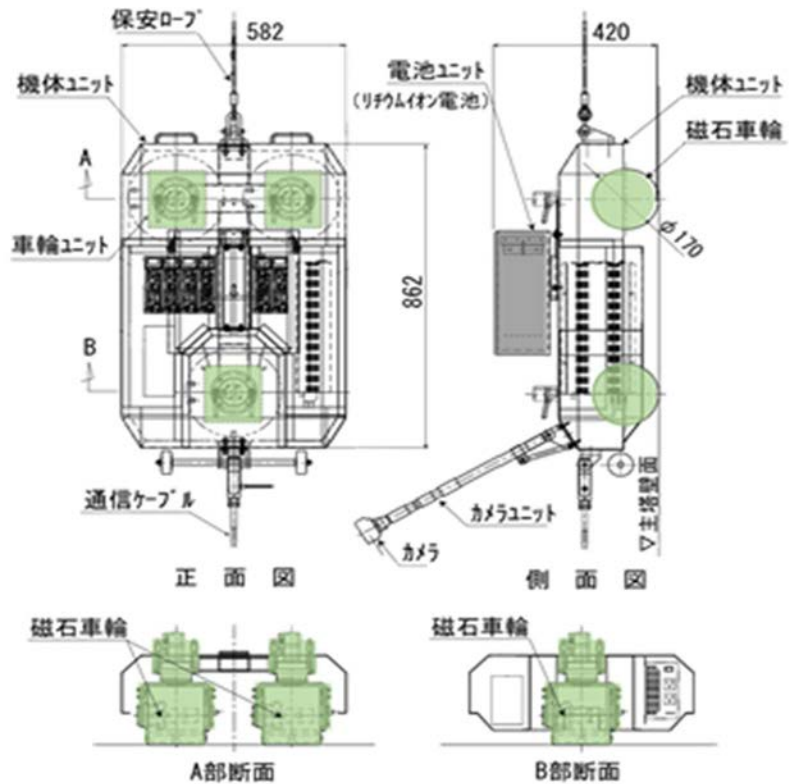
このため、実測値を基に再度設計照査を実施し、安全性等が問題ないことを確認した。

② 巻取装置の性能試験

巻取装置の巻取り力及びブレーキ保持力を測定し、所定の性能を有していることを確認した（写真－4）。



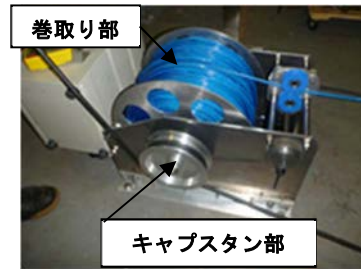
写真－3 磁石車輪の試験状況



図－5 主塔点検ロボットの一般図

表－3 磁石車輪単体試験の結果

項目	部位	吸着力 (kN)	
		設計値	計測値
平面部	上輪	1.47	1.35
	下輪	1.08	1.20
添接板	上輪	0.44	0.41
	下輪	0.32	0.35



写真－4 巻取装置の試験状況

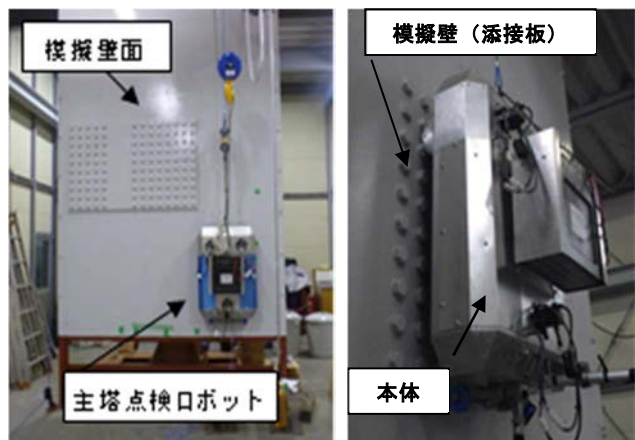
2) 走行性能の確認

模擬壁面により昇降、横行、斜行等の各種試験を実施し、平坦部での設計走行（昇降）速度（10m/分）を満足すること、段差部を円滑に通過するための走行速度が 3m/分であることを確認した。また、磁石車輪のステアリング機能（可動範囲：0～90°）の確認では、平坦部で壁面や車輪を痛めることなく円滑に作動できること、横行と斜行も良好に行えることを確認した（写真－5）。

3) 耐久性の確認

リチウムイオン電池の満充電から使用限界電圧までの走行可能距離が約980m(明石主塔：1.5往復分以上)であることを確認した。

また、平坦部及び段差部における連続走行（平坦部：980m、段差部：552m(明石主塔4往復相当)）を



写真－5 室内試験の状況

実施し、磁石車輪外周部のゴムライニングの破損等はなく耐久性を有することを確認した。

4) 安全対策の確認

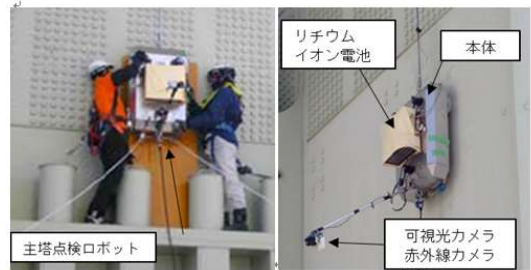
主塔点検ロボットに巻取装置と保安ロープを取り付けて下降させ、途中で電源を遮断しても保安ロープにより主塔点検ロボットが落下しないことを確認した。さらに、非常時の主塔点検ロボット回収機構の確認として通信ケーブルを巻取装置のキャプスタンで巻き取り、主塔点検ロボットが下降できることを確認した。

3.7 主塔点検ロボットの実橋試験

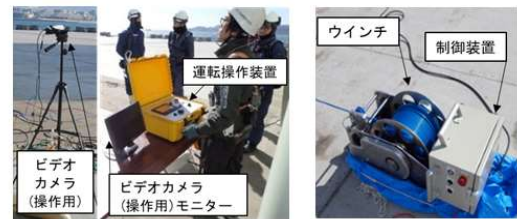
工場での室内試験により、主塔点検ロボットの基本性能及び走行等の動作状況の確認が得られたことから、明石海峡大橋2P主塔（東塔柱）の塔柱内側面（補剛桁下部、高さ：55 m）において実橋試験を行った結果、当初設定した基本条件の機能・性能を確保していることが確認できた。実橋試験における確認結果を表－4に、実橋試験の状況を写真－6に示す。

表－4 実橋試験の確認結果

確認項目	確認結果
① 走行性能	<ul style="list-style-type: none"> 延べ約1,000 mの走行で、平坦部：5～10 m/分、段差部：3 m/分での円滑走行を確認。 平坦部において、横行走行、斜行走行の円滑な走行を確認。 添接板を乗り越える時に磁石車輪と添接板の位置を確認する前方確認用カメラが必要であることを確認。
② 電池容量の確認	<ul style="list-style-type: none"> 主塔点検ロボットに搭載したリチウムイオン電池は明石海峡大橋の主塔基部～塔頂部までの約300 mを1往復以上走行できることを確認した。
③ カメラによる点検性能	<ul style="list-style-type: none"> 点検装置の可視光カメラによる撮影画像は、主塔壁面の塗膜等の劣化部の範囲、形状、状態等の詳細な変状の把握が十分可能であることを確認できた。 点検時の速度は3～5 m/分が最適であることを確認した（橋梁点検技術者の意見）。
④ 安全対策の確認	<ul style="list-style-type: none"> 主塔壁面での主塔点検ロボットの電源断による停止時（故障時想定）にも落下しないことと、通信ケーブルを巻取装置のキャプスタンで巻き取りロボットが塔基部へ回収できることを確認した。



(a) 主塔点検ロボットの設置・走行状況



(b) 遠隔操作装置

(c) 巻取装置

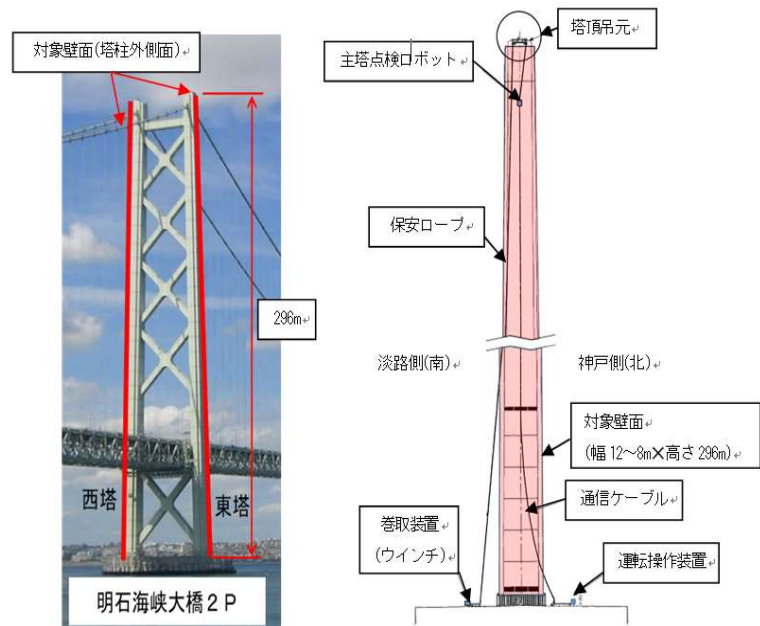
写真－6 実橋試験の状況

(1) 点検試験運用の概要と結果

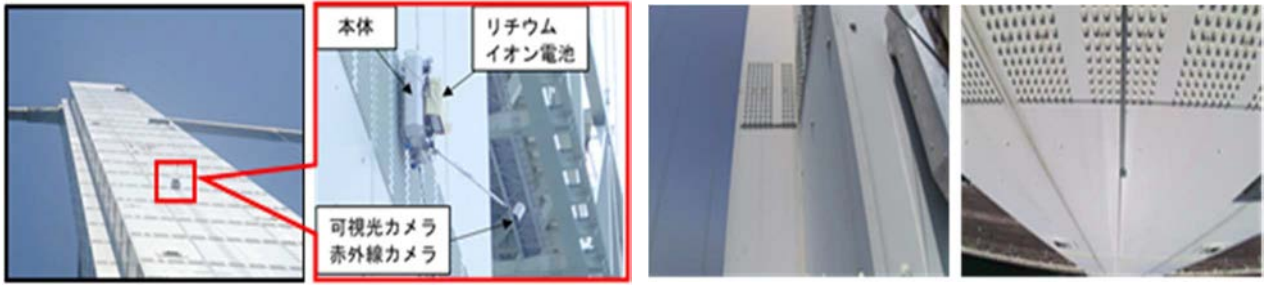
実橋試験により良好な結果が得られたことから、明石海峡大橋 2P（東西塔柱）の塔柱外側面（幅約 12～8m×高さ 296m の範囲）で主塔点検ロボットを昇降させ壁面観察と撮影を行う点検試験運用（図－6、写真－7）を実施した。

結果を以下に述べる。

- ①塔柱外側面の基礎部から塔頂までの範囲を2往復（走行時間約280分：約70分/片道×4回）で点検できた。
- ②カメラポールを90°横に張り出し、塔柱外側面の側端部を走行すれば外側面が点検できることを確認した。
- ③点検作業は塔柱外側面1面を2日で点検できた。



図－6 塔柱外側面での点検試験運用イメージ図



(a) 主塔点検ロボットによる壁面の点検状況

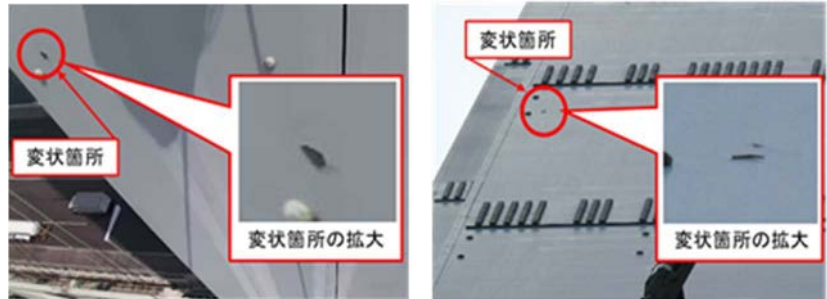
(b) 外隅部の撮影画像

(c) 平面部の撮影画像

写真－7 試験運用の状況

④今回撮影した主塔点検ロボットの可視光カメラの画像と高画質カメラによる主塔基部からの撮影画像を比較した結果を写真－8に示す。主塔点検ロボットの可視光カメラは、より鮮明に変状部位の範囲、形状、劣化の状態等の把握ができることを確認できた。

⑤前方確認カメラより、主塔点検ロボットと添接ボルトの位置関係が明確になり、段差乗り越えも円滑に行うことができた。更に、塔壁に設置されている設置物等との位置関係も明確になり、操作性も向上した。



(a) 主塔点検ロボット撮影画像

(b) 高画質カメラの撮影画像

写真－8 撮影画像の比較

(2) 点検試験運用における今後の改善事項

主塔点検ロボットの点検試験運用後の点検員からの改善要望と改善案を表－5に示す。今後、これらの改善要望を踏まえ、より使用性の高い点検機器への改善を図る予定である。

表－5 撮点検試験運用後の主塔点検ロボットの改善要望と改善比較

改善要望	改善案
①記録した画像の位置把握に手間がかかる。	主塔壁面に段差番号を表示する。
②点検装置の操作性向上。 (前方位置確認用カメラ有、後方位置確認用カメラ無)	後方位置確認用カメラを追加する。
③外隅面撮影時にカメラ角度調整が難しい。 (カメラホル取付部が斜めになっている)	カメラホル取付部が平坦になるよう台座を改造する。
④操作レバーの操作性向上。 (長時間運転時に指が疲れる)	操作レバーを改造する。 (レバーを長いタイプに変更もしくはペンダントスイッチに変更)
⑤運転者の操作性向上。 (位置確認用カメラの画像が運転者から離れた位置にある)	操作盤内に位置確認カメラ用モニターを設置する。
⑥保安ロープの盛り替えが必要。 (主塔幅の半分で味側と巻取装置側のロープを盛り替えている)	塔頂吊元の位置が自由に替えられるように改造する。

4. 赤外線サーモグラフィを用いた鋼床版ビード貫通亀裂の点検

4.1 概要

鋼床版は、軽量でかつ短期間の現地施工が可能であり、設計の自由度が高いことが特徴である。一

方、図-7に示す縦リブにUリブを用いた閉断面鋼床版では、大型車両の通行に起因する図-8に示すデッキプレートとUリブの溶接部のルート部から溶接ビードを貫通する亀裂、いわゆる「ビード貫通亀裂」が各機関において数多く報告されている^{1) 2) 3)}。本四連絡橋でも、平成15年に初めてビード貫通亀裂が発見されてから現在までに数十箇所が確認されており、これまでに亀裂の検出・評価・補修に関する検討が行われている。

4.2 点検の原理

ビード貫通亀裂の点検は、一般的に目視点検により塗膜割れやさび汁の発生を捉え、疲労亀裂の疑いがあれば非破壊検査等により調査している。しかし、目視点検では、塗膜割れを伴わない疲労亀裂の発見は困難であり、塗膜割れやさび汁の発生段階では、亀裂長さが長いものが多い。また、一般的な非破壊検査では、塗膜の除去が必要となるため、近接作業用の足場の設置・撤去が必要となることが多い。そのため、遠距離から、塗装を剥ぐことなく亀裂を検出することができる赤外線サーモグラフィを用いたビード貫通亀裂の検出法を神戸大学・滋賀県立大学と共同で開発し特許を取得した。

図-9に本検出法の原理を、図-10に検出結果の一例を示す。検出原理は、路面が日射を受け、舗装が温められるとデッキプレートを介してUリブへと熱が伝わる際に溶接部に亀裂が存在する場合は、亀裂の微小な隙間により熱伝導が阻害されることで生じるデッキプレートとUリブの間の大きな温度差(以下、「温度ギャップ」という)に着目したものである。この温度ギャップを、赤外線サーモグラフィで検知することで、ビード貫通亀裂を検出する。以下、本検出法を「温度ギャップ法」と呼ぶ。この温度ギャップ法を用いることにより、従来の点検では検出できなかった塗膜割れやさび汁を伴わない亀裂も遠隔非破壊・非接触で検出することが可能となった。

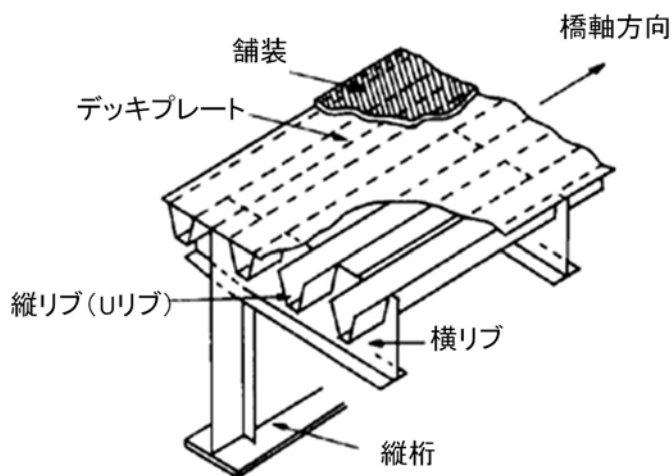


図-7 Uリブ鋼床版



図-8 ビード貫通亀裂

これまでの研究では、ビード表面まで貫通した40mm程度の亀裂を確実に検出することが可能であることが判明している。現在、ビード貫通前の、表面に現れていない内在している亀裂に対しても、実験室レベルで検出が可能であることを確認している⁴⁾。

4.3 システム開発による点検の効率化

この温度ギャップ法による点検は、従来手法に比べ高精度かつ効率的に点検可能な手法とはいえ、管理する鋼床版の総車線延長が約100kmと膨大であるため、点検対象となる各橋梁の状況にあった効率的な撮影方法と温度画像からの確実な亀裂検出アルゴリズムの開発を実施した。

写真-9に開発した撮影・録画システムを、写真-10に瀬戸大橋での点検状況を示す。撮影・録

画システムは、赤外線カメラを搭載したモーター駆動による自走式台車と、PCなどの撮影制御・録画装置から構成され、設置されたレールに沿って移動しながら対象箇所の温度画像を連続撮影できる。また、ロータリーエンコーダを搭載し赤外線データと位置情報を同期させており、温度画像から亀裂が検出された場合に亀裂位置を容易に特定できるようにしている。さらに、赤外線カメラはボロメータタイプとし、将来鋼床版直下に作業車等がない場合でもワイヤー等による撮影により温度画像が取得可能な軽量小型な機種を選定している。撮影制御・録画装置には、赤外線カメラや自走式台車の制御機能、録画・表示機能があり、撮影開始時の環境条件確認やリアルタイムでの温度画像表示を可能とした。

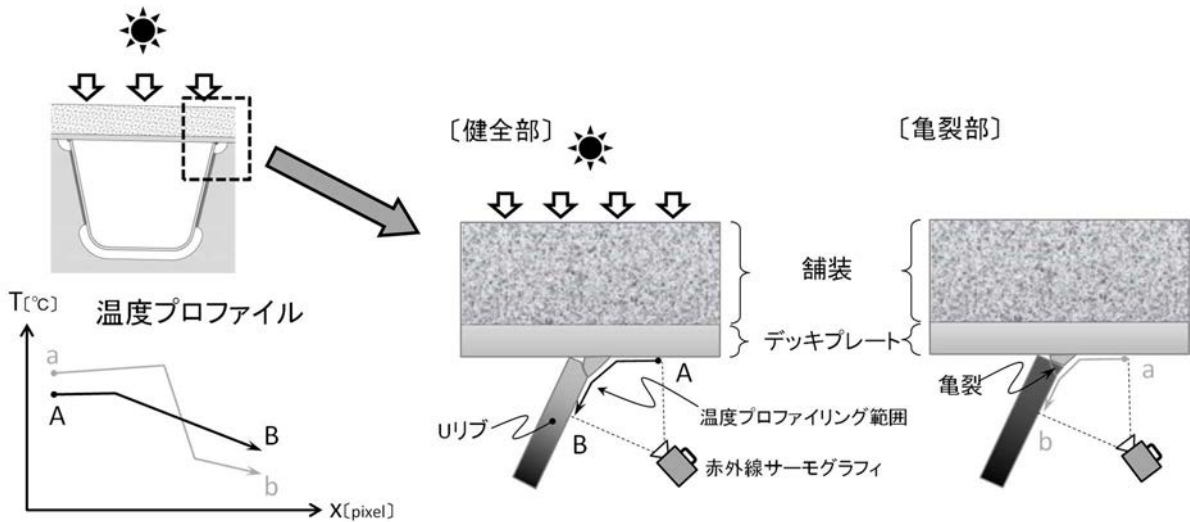


図-9 温度ギャップ法の原理

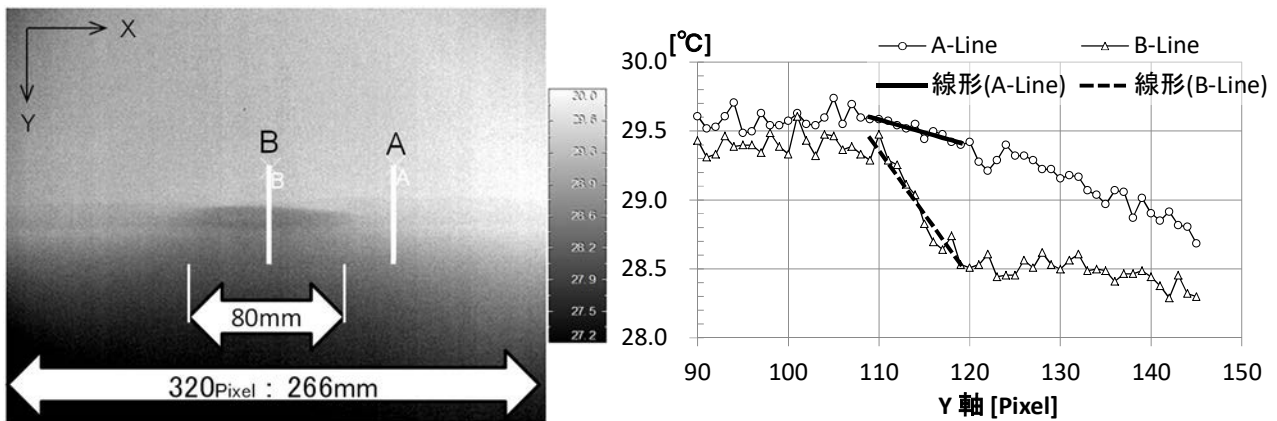


図-10 温度ギャップ法による亀裂検出例

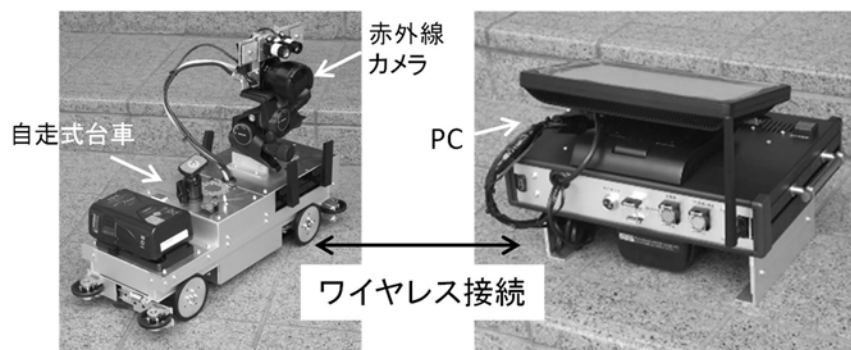


写真-9 撮影・録画システム

なお自走式台車と撮影制御・録画装置は、当初有線で接続していたが現在はワイヤレス接続に改良している。これにより撮影作業効率はさらに向上した。

4.4 現在の点検状況と今後の計画

現在、瀬戸大橋及び大鳴門橋関連区間で本点検手法による鋼床版溶接部の点検を実施中である。瀬戸大橋ではまだビード貫通亀裂は見つかっていない。大鳴門橋関連区間の門崎高架橋では既にこの亀裂が見つかっており、損傷状況と亀裂進展状況を確認しながら効率的な補修を順次進めているところである⁵⁾。



写真-10 瀬戸大橋での使用状況

5. 吊橋ハンガーロープ画像診断システム

吊橋ハンガーロープに対しては、橋上や作業車の上から目視やカメラ撮影による画像で変状がないかを確認するのが通常の手法である。しかし目視やカメラ撮影する位置の制約からハンガーロープ全周の確認は容易ではない。これらの課題を解決するため、(株)ブリッジ・エンジニアリングにおいて、吊橋ハンガーロープの外観調査を複数のカメラを搭載した昇降機で行い、その評価をAIに学習させることで業務を効率的に行う「ハンガーロープ画像診断システム」を開発検討している(図-12)。

このシステムにより、位置情報を紐付けたハンガーロープ全周の近接画像を取得することが可能となり(図-13)、画像データを記録・保存することで経年変化をより客観的に判断することや劣化予測のためのデータを得ることが可能になる。

現在、画像撮影のための設備の更なる効率化と画像処理システムの構築に取り組んでおり(図-14)、今後AI技術を活用した画像診断の適用範囲拡大や点検作業効率化のための技術開発を進めていきます。

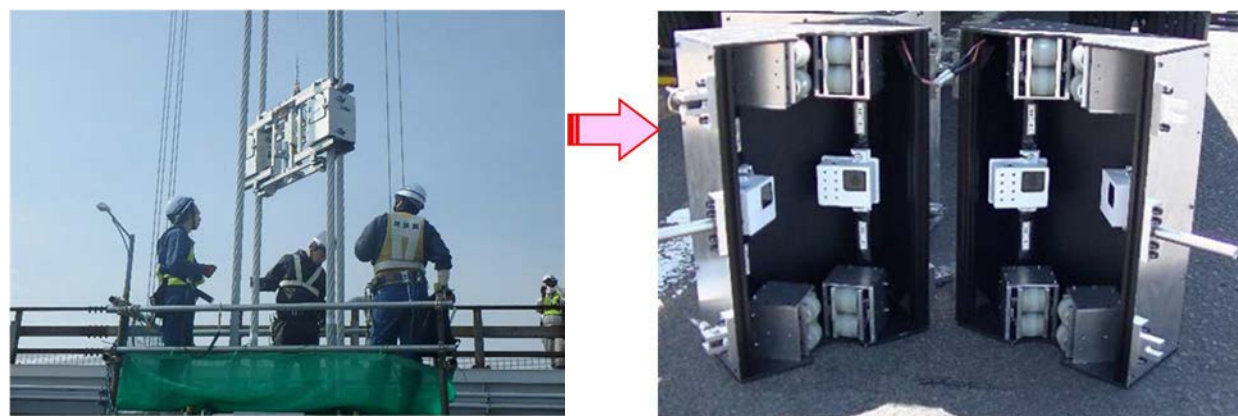


図-12 吊橋ハンガーロープ画像診断システム

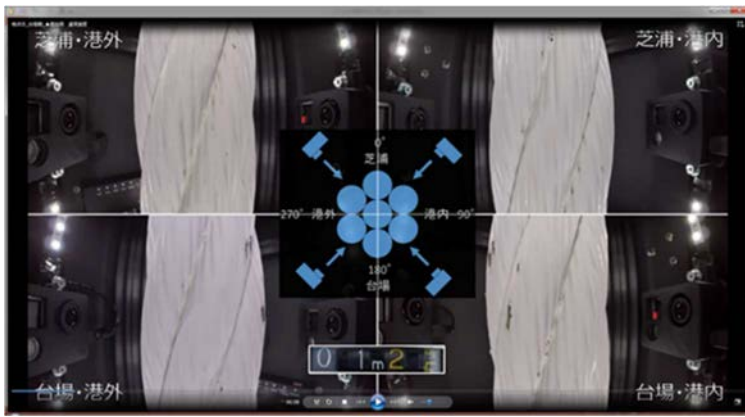


図-13 ハンガーロープ画像撮

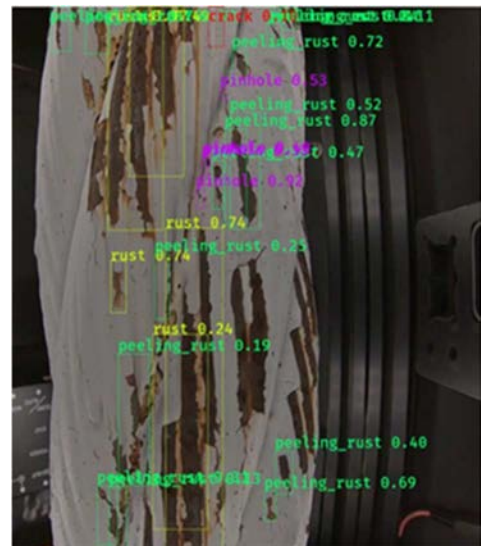


図-14 ハンガーロープ画像 AI 診断

おわりに

本州四国連絡高速道路では、長大橋梁の点検手法について、本稿で紹介した主塔点検ロボットの開発によるアプローチ率改善といった点検困難箇所への対応や赤外線サーモグラフィによる亀裂検出技術の他にも、明石主塔作業車の開発、ドローンによる点検の検討、橋梁点検補修用作業車の改造によるアプローチ率改善等を行ってきている。さらにAIによる画像診断など新たな新技術の開発により、点検の効率化、点検精度の向上、損傷を早期に見つけられるような取組をグループ会社と情報共有をしつつ一体で進めているところである。今後も効率的で確実な点検と維持補修のサイクルにより 200 年以上の長期にわたり利用される橋をめざし、万全な維持管理に努めていきたいと考えている。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2017. 11.
- 2) 日本道路協会：鋼道路橋の疲労設計指針，2002. 3.
- 3) (財)阪神高速道路管理技術センター：阪神高速道路における鋼橋の疲労対策，2014. 3.
- 4) 和泉遊以，阪上隆英，溝上善昭，森山彰，三宮広之：温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による裏面き裂の検出・評価，第71回土木学会年次学術講演会，2016. 9.
- 5) 溝上善昭，森山彰，貴志友基：鋼床版Uリブとデッキ間のビード貫通亀裂に対するTRSを用いた下面補修法の開発，本四技報，Vol. 41 No. 128，2017. 3.
- 6) 東秀樹，香川晃，敷地直城，中村将秀：長大橋主塔点検ロボットの開発，本四技報，Vol. 44 No. 134，2020. 3.