

赤外線サーモグラフィによる維持管理技術 高度化に関する技術開発の現状と今後

溝上 善昭¹・森山 彰¹・花井 拓²

¹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

²本州四国連絡高速道路株式会社 長大橋技術センター 総括・耐震グループ
(〒651-0088 兵庫県神戸市中央区小野柄通4-1-22)

近年、老朽化する膨大な道路構造物等に対し、効果的・効率的な維持管理のための技術開発が求められている。一方、構造物によっては近接手段が限定される場合もあり、これらを効率的に維持管理していくためには、非破壊・非接触による点検・診断技術の開発が望ましい。本四高速では、非破壊・非接触で計測可能な赤外線サーモグラフィに着目し、維持管理技術の高度化を目的とした技術開発を行っている。本稿では、道路構造物等のメンテナンスサイクルの中での赤外線サーモグラフィを活用した技術開発の現況と今後の取り組みについて述べる。

キーワード 赤外線サーモグラフィ, 点検, 診断, 補修効果検証

1. はじめに

赤外線サーモグラフィは対象物温度の空間的分布や時間的変化を計測するものであるが、構造物の活荷重等による応力変化、あるいは、変状（亀裂、剥離など）の存在による温度特異場が現れる場合に点検や診断への適用が可能となる。

道路構造物等の適切な維持管理を行っていく上で、「点検 診断 措置 記録」というメンテナンスサイクルを確立する¹⁾必要がある。このメンテナンスサイクルの効率的な実施に向けて、本四高速では赤外線サーモグラフィを用いた維持管理技術の開発を行っている。なお、これらの技術開発は、神戸大学（阪上隆英教授）との共同研究として実施している。図-1に、メンテナンスサイクル各段階において、本四高速で実施している赤外線サーモグラフィ技術開発の状況を示す。以降の章では、それぞれの技術開発について述べる。

2. 点検技術

(1) Uリブ鋼床版ビード貫通亀裂の検出

a) 検出原理と性能

本四連絡橋の鋼床版では、デッキプレートとUリブのすみ肉溶接部の疲労亀裂が平成15年に初めて発見されて以来、現在までに数十箇所が確認されている。従来、疲労亀裂の検出は、目視点検によって塗膜割れや錆汁を捉え、輪荷重位置や構造詳細等を評価し、疲労亀裂の疑いがあれば亀裂の有無を非破壊検査などで調査することとされていた。一般的な非破壊検査は、塗膜を除去するため近接作業用の足場設置・撤去が必要になるケースが多いことから、簡単に実施できない。また、塗膜割れや錆汁の発生段階での発見では、亀裂長さが数十cmに達しているケースもある。そのため、亀裂の発生例が多い、鋼床版のデッキプレート-Uリブ間の溶接部に生じるビード貫通亀裂を対象とし、赤外線サーモグラフィによる温度分布計測によって塗膜を除去することなく遠隔から非破壊で、高効率・高精度で、亀裂を検出できる新しい検査法を開発²⁾した。

開発した亀裂検出法の原理を図-2に、検出結果の一例を図-3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を介してUリブへと熱が伝わる。溶接部に亀裂が存在する場合は、亀裂の微小な隙間により熱伝導が阻害されるため、デッキとUリブ間に大きな温度差（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により、塗装された状

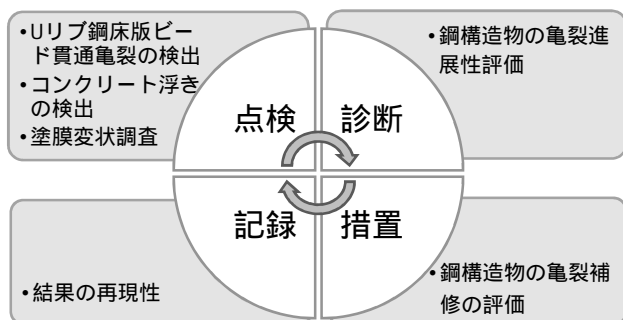


図-1 赤外線サーモグラフィ技術開発の状況

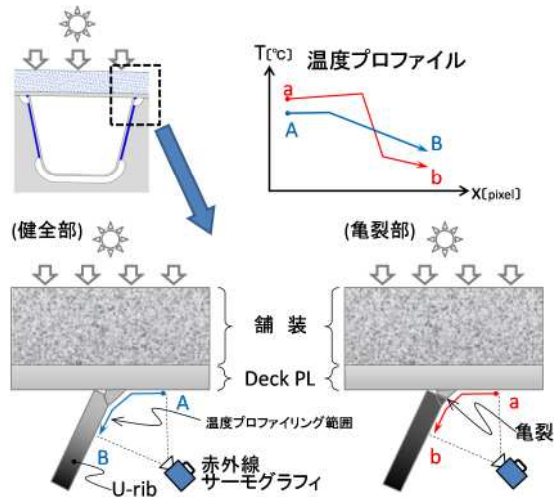
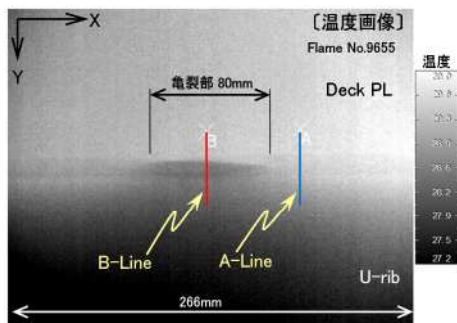


図-2 温度ギャップ法の原理



撮影解像度：0.83 mm/Pixel

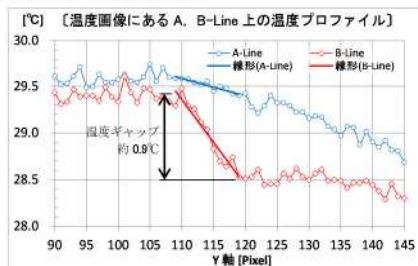


図-3 検出した亀裂の温度画像と温度プロファイル

態のまま検出し、亀裂を特定する。以下、本手法を「温度ギャップ法」と呼ぶ。

温度ギャップ法の開発時に、疲労亀裂が発見された橋梁を調査対象とし検証実験等を行い以下を確認している。

- 重防食塗装下の亀裂に対し、塗膜を剥ぐことなく探傷出来る。
- 赤外線サーモグラフィを作業車などに搭載し、橋軸方向に連続撮影を行うことができる。
- 目視では発見できない塗膜割れを伴わない亀裂を検出可能である。
- 表面亀裂長さ40mm程度の亀裂を検出するためには、温度分解能0.03～0.06 程度の機種を使用し、撮影解像度を1mm/pixelで撮影する必要がある。
- 計測時期はデッキプレートとUリブの温度差が0.7 以上となる3～9月が望ましい。



写真-1 撮影・録画システム

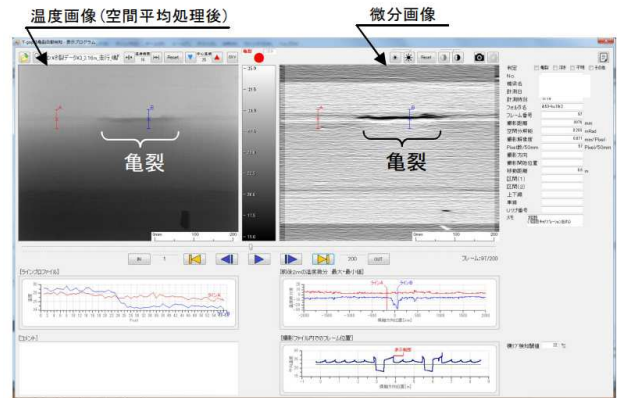


図-4 解析・閲覧システム

なお、温度ギャップ法による鋼床版の疲労点検は、大型車交通量が多く、耐疲労性に劣る鋼床版ディテイルを有する橋梁の走行車線から計画的に実施している。

b) 亀裂検出装置の開発と今後

本四高速の管理する鋼床版の車線総延長は約100kmと膨大であることに加え、全ての橋梁が赤外線サーモグラフィを搭載して橋軸方向に連続的に移動することができる作業車を有しているわけではない。そのため、点検対象となる各橋梁の状況にあった撮影方法を検討するとともに、撮影・録画と亀裂判定まで含めた装置開発をグループ会社と共同で実施している³⁾。写真-1は、赤外線サーモグラフィを台車上に搭載し、管理路上を走行できる撮影・録画システムである。また、これまでの方法では、評価者が温度画像コントラストの違いから疑わしい箇所を抽出し、温度プロファイル等を参考に亀裂検出している。また、亀裂位置は、作業車の移動速度や温度画像に写り込む構造的な温度特異場などから特定していた。これに対して、開発した解析・閲覧システムでは、「亀裂」と「亀裂以外（浮きや汚れ）」をアルゴリズムに基づいて自動検知し、位置情報も同期させるシステムとした（図-4）。

前述したとおり、温度ギャップ法はビード貫通亀裂を対象として開発されたが、亀裂がビード表面に現れてい

ない亀裂に対しても、温度画像を解析することにより検出と形状の評価がある程度可能であることが実験室レベルで確認されている⁴⁾。貫通していない状態にある亀裂まで検知できれば、亀裂をより早期の段階からモニタリングすることが可能になる。

今後は、以下の開発を進める予定である。

- 上記以外の環境での連続撮影手法の検討、開発
- 可視動画を同期させた亀裂判定補助システムおよび亀裂自動検知誤認識軽減システムの開発
- 実際の鋼床版での貫通していない亀裂の検出性能の確認実験

(2) アクティブ法によるコンクリート浮きの検出⁵⁾⁶⁾

高橋脚の橋梁や、桁幅の広い橋梁においては、近接手段となる橋梁点検車や高所作業車による接近が困難な部位が存在する。そのような部位のコンクリート部材の点検手法として、赤外線サーモグラフィにより遠隔から浮きや剥離を検出する方法があるが、日照が期待できない床版下面では、外気温による熱移動のみのため、外気温変化がなくなる時間帯の点検は制約され、熱移動も小さいことから信頼性が不十分になる可能性がある。そのような場合の対処方法として、点検の対象箇所をヒーターなどにより加熱し、健全部と欠陥部の温度差を強制的に

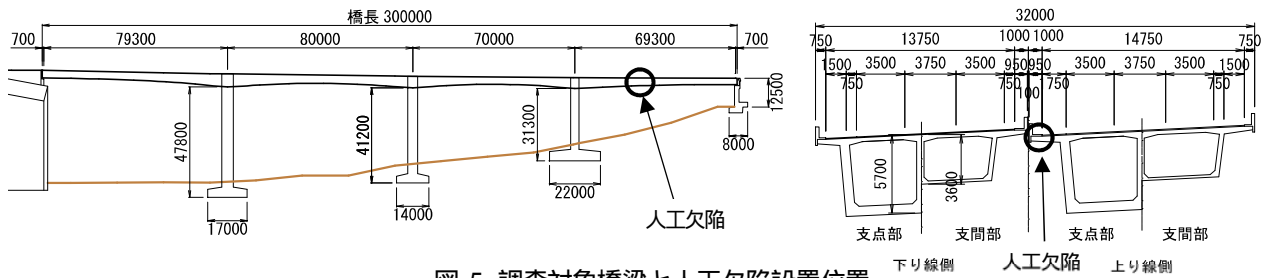


図-5 調査対象橋梁と人工欠陥設置位置

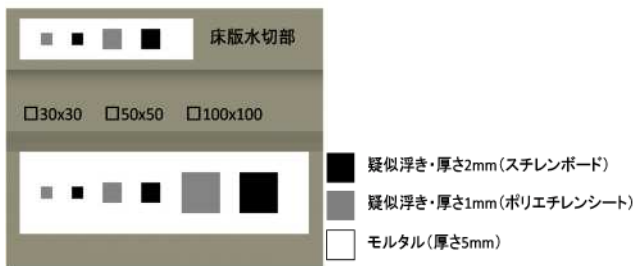


図-6 人工欠陥の形状

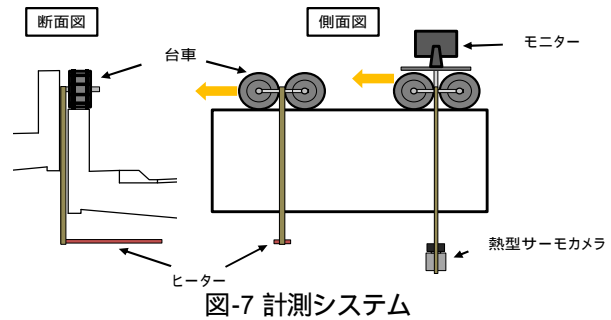


図-7 計測システム



写真-2 橋上での作業状況



写真-3 張出床版下面での計測状況

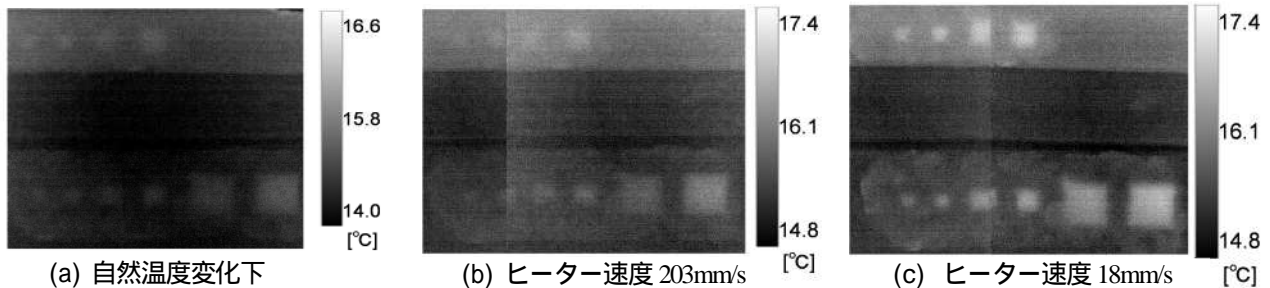


図-8 人工欠陥の温度画像

発生させて計測するアクティブ法がある．ここでは，桁幅が広く橋梁点検車による点検が困難である，高橋脚を有する上下線分離のPC箱桁橋の上り線・追越車線側の張出床版下面を対象として，アクティブ法を用い，桁上から赤外線サーモグラフィを懸垂させて点検を行う手法について検討を行った．

計測対象とする欠陥は図-5，図-6に示すように人工的にコンクリートの浮きを模擬したものを張出床版下面に設置した．計測を行ったシステムを図-7に示す．加熱のための棒状ラインヒーターと赤外線カメラを桁の間に懸垂させ，橋軸方向の移動については高欄上に台車を設置してそれを走行させることによって実施した．橋上での作業状況を写真-2に，張出床版下面の計測状況を写真-3に示す．

結果を図-8に示す．ヒーターで加熱することによって，自然温度変化下よりも人工欠陥が明確に検出されている．また，ヒーターを低速で移動させた方が人工欠陥部のコントラストが改善され，検出性が向上していることが分かる．

今後は，実際の欠陥がどのように見えるかについて現場での確認を実施していく予定としている．

(3) 塗膜変状調査

鋼橋塗膜の状況については，点検員による目視点検で行っている．この点検の効率化を目的として，赤外線サーモグラフィを用いた点検を実施した．対象は鋼箱桁斜

張橋の鋼床版裏面（縦桁間）とした．外面作業車に赤外線カメラを設置し，連続的に鋼床版裏面の状況を撮影した（図-9）．撮影した結果を図-10に示す．赤外線サーモグラフィによる撮影画像では，点検員の確認した塗膜浮きを確認しているのみならず，その他の変状の可能性もある箇所についても捕捉している．その一方で，表層のみの剥がれについては，赤外線サーモグラフィでは検知が困難であった．

現在，変状図の作成には多大な労力を要しているが，変状分布図の作成や進展性の判断に赤外線サーモグラフィを用いることで，点検業務の省力化に大きく寄与するものと考えている．

3. 診断・評価技術

(1) 熱弾性応力計測による鋼構造物の亀裂進展性評価⁷⁾

鋼構造物に生じている疲労亀裂の補修優先度や補修方法を判断するにあたっては，その亀裂が今後どの程度の速度で進展していくかを評価することが，安全性を確保する上で必要となる．この亀裂進展性を評価する手法として，赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力分布計測法が近年注目されている．断熱状態の材料に弾性変形が生じる時，主応力 $\Delta\sigma$ と温度変化 ΔT の関係は，次の式(1)のように表されるが，この関係式を用いて赤外線サーモグラフィによって計測された温度分布から応力分

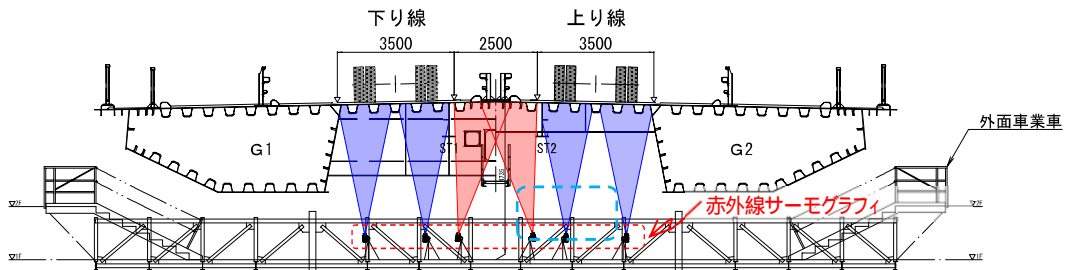
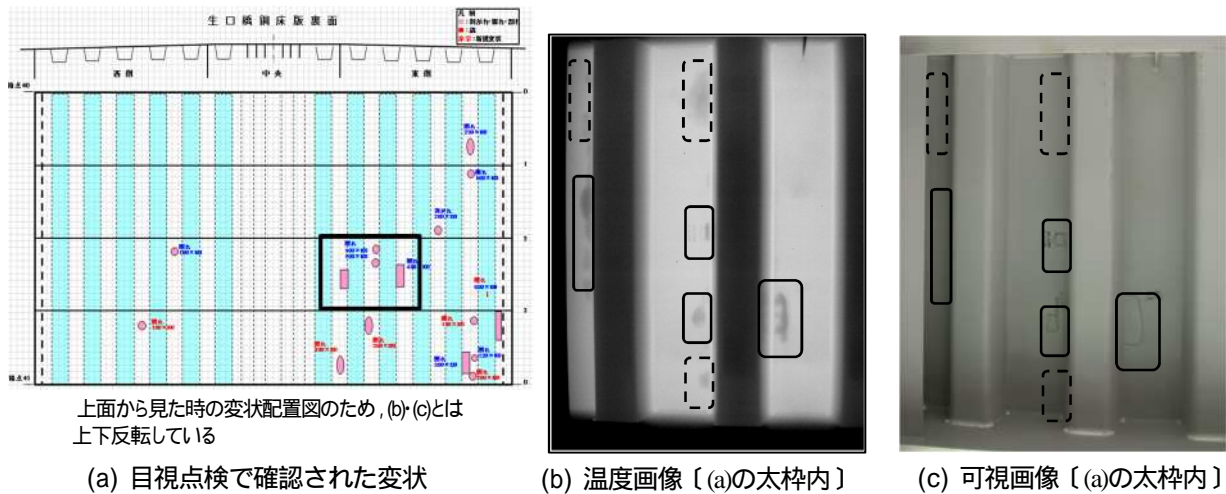


図-9 塗膜変状調査対象橋梁 断面図と作業車



上面から見た時の変状配置図のため，(b)・(c)とは上下反転している

(a) 目視点検で確認された変状

(b) 温度画像〔(a)の太枠内〕

(c) 可視画像〔(a)の太枠内〕

図-10 撮影結果の一例

〔(a)・(b)の凡例〕
実線：目視点検と一致
破線：目視点検と不一致

布が得られる。

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho C_p} T \Delta \sigma = -k T \Delta \sigma \quad (1)$$

α : 線膨張係数, ρ : 密度, C_p : 定圧比熱, k : 熱弾性係数

この手法を用いて計測された応力分布から亀裂進展性を評価する手法の開発を行っている。

a) 面外ガセット継手の亀裂進展性

まずは、主桁ウェブと横桁フランジの面外ガセット継手の溶接部に生じる疲労亀裂を対象として、試験体(図-11)を製作し、板曲げ振動疲労試験機を用いて繰り返し曲げ負荷を加え、亀裂の進展度と赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力の計測を行った。図-12に熱弾性応力分布より得られた応力拡大係数と亀裂進展速度の関係を示す。両者の相関は高く、赤外線応力計測結果から亀裂の進展性を評価できることが確認できた。

b) ウェブギャップ板の亀裂進展性

次に、斜張橋鋼床版の支点上縦桁横桁交差部の補剛材(ウェブギャップ板)上縁端部のまわし溶接部の一部に疲労亀裂の発生が確認されている(図-13)。この亀裂の進展性評価法を確立するために、当該部位を模擬した試験体を用いて同様の試験を実施する予定としている(図-14)。また、実際の橋梁においても経時的な亀裂の進展と、熱弾性応力の計測を行い、本手法の実用化に向けた検討に取り組んでいる。

さらに、面的な応力場を計測することにより、溶接継手疲労寿命予測手法としても適用できないか検討してい

きたいと考えている。

4. 補修対策評価技術

(1) 熱弾性応力計測による鋼構造物の亀裂補修の評価⁸⁾⁹⁾

図-13に示した垂直補剛材に生じている疲労亀裂については、補修工法の試験施工とその効果確認を行った。図-15に実施した補修案を示す。切り欠き補修案は垂直補剛材上縁端部に集中している応力を切り欠き(R部)に分散させることを目的とした補修法であり、FEM解析によりRサイズを決めている。あて板補修案は垂直補剛材上縁端部に集中している応力をあて板に移動させ、上縁端部の応力低減を図ることを目的とした補修方法である。

これらの補修案の効果を確認するため、橋上に荷重車を走行させ、ひずみ計測と、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力計測を行った。計測は補修前と補修後に実施した。熱弾性応力計測結果を図-16、図-17に示す。切り欠き案では、亀裂先端位置の応力集中がR部に移ったことが確認された。また、あて板案については溶接端部の応力集中箇所の改善は見られなかった。これらの結果は、ひずみゲージによる計測結果とも整合している。

今後、より施工性が良い補修案についても検討を行う予定としているが、これらについても熱弾性応力計測による効果確認(着目部位の応力低減効果の確認、その他の部位に過度な応力が発生していないかの確認)を行う予定としている。

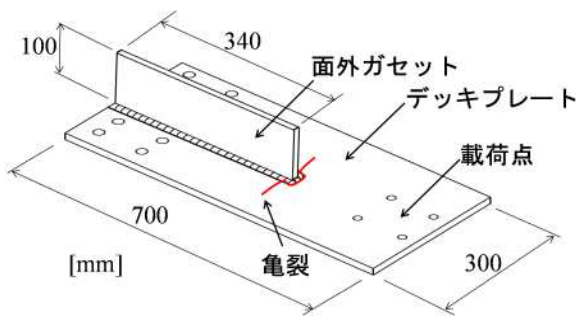


図-11 面外ガセット継手試験体

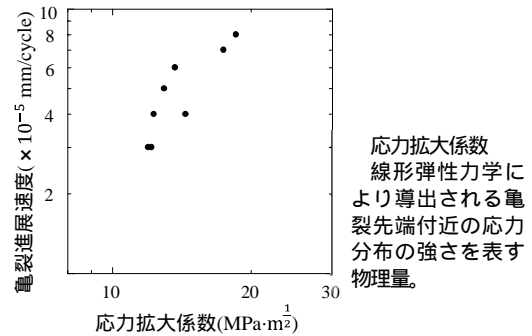


図-12 応力拡大係数と亀裂進展速度の関係

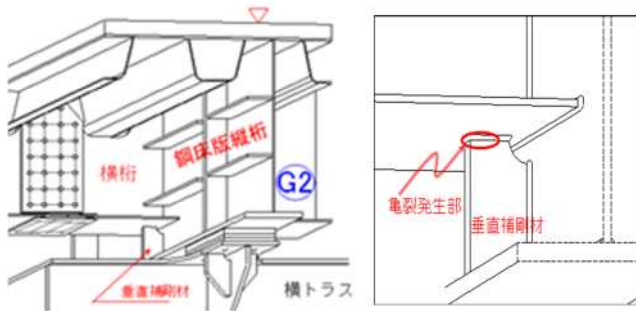


図-13 縦桁横桁交差部補剛材の亀裂発生箇所

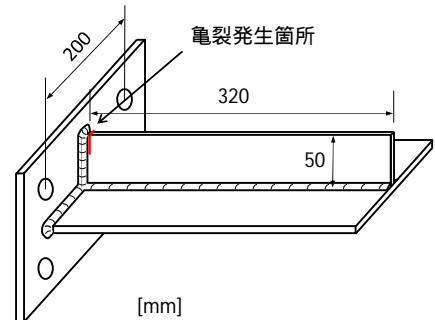


図-14 垂直補剛材試験体

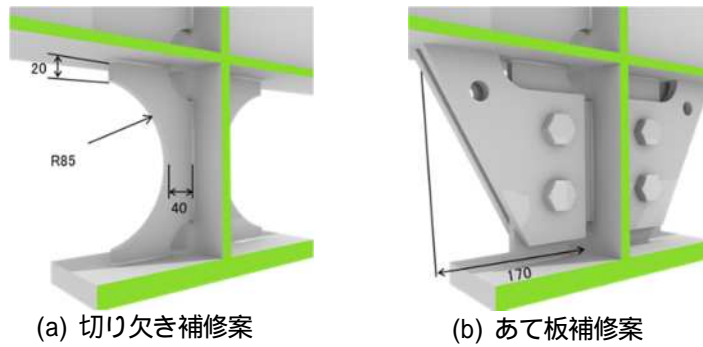


図-15 補修工法案体(単位: mm)

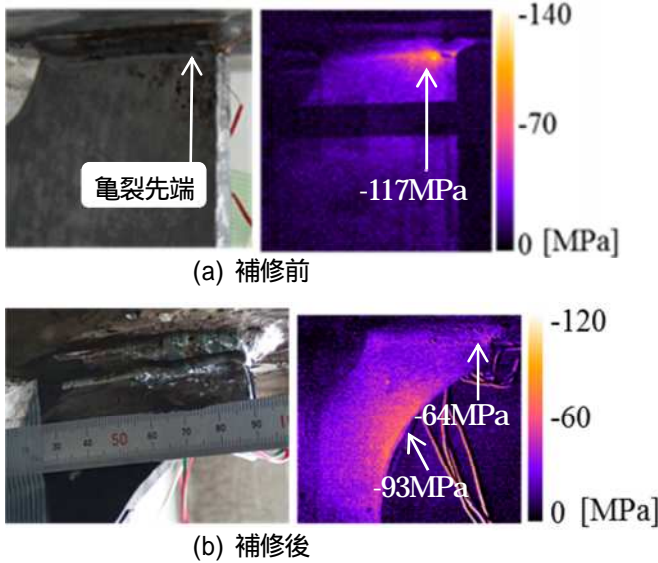


図-16 切り欠き補修前後の熱弾性応力計測結果

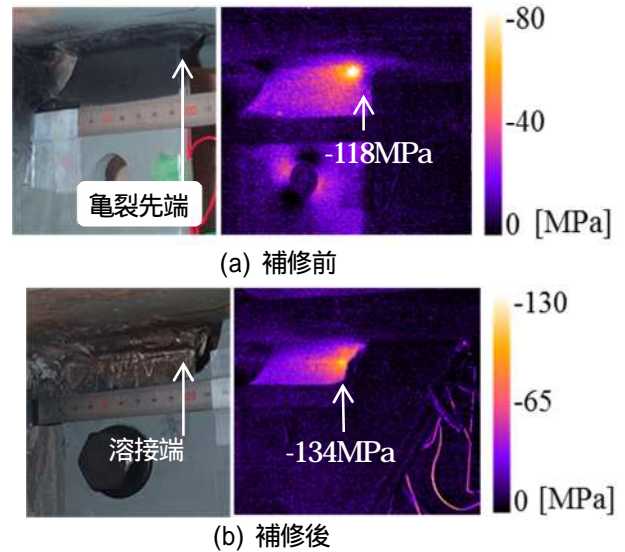


図-17 あて板補修前後の熱弾性応力計測結果

5. まとめ

道路構造物等のメンテナンスサイクルの中での赤外線サーモグラフィを活用する取り組みについて述べた。本四高速では、道路構造物等の供用年数や交通量の増加に伴い鋼構造物の疲労亀裂、塗膜の変状、コンクリート構造物の劣化などの増加が懸念される。膨大な数の構造物に生じる変状を早い段階で把握することは本四連絡橋を超長期にわたって管理していく上で非常に重要と考えている。今後も維持管理の現場のニーズを的確に把握し、構造物の変状を早期かつ効率的に検出、評価するため、赤外線サーモグラフィを活用する手法についての検討を続けていく。

参考文献

- 1) 国土交通省道路局：道路の維持修繕に関する省令・告示の制定について，2014.4
- 2) 溝上善昭，小林義弘，和泉遊以，阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ検知による鋼床版デッキプレート-U リブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出，鋼構造論文集，Vol.22，No.87，2015.9

- 3) 大藤時秀，溝上善昭，和泉遊以，阪上隆英：温度ギャップ検出赤外線サーモグラフィ法による亀裂検出実用化システム，第71回土木学会年次学術講演会，2016.9
- 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) 阪上隆英，溝上善昭，花井拓，森山彰，竹内優人，藤本泰成り，塩澤大輝，和泉遊以，遠藤健：アクティブ赤外線サーモグラフィ法によるコンクリート構造物の非破壊検査，第71回土木学会年次学術講演会，2016.9
- 6) 溝上善昭，花井拓，阪上隆英，竹内優人，和泉遊以：走査加熱を用いたコンクリート構造物のアクティブサーモグラフィ非破壊検査試験，第16回コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム，2016.10
- 7) 藤本泰成，藤城忠朗，和泉遊以，大谷直矢，小林義弘，阪上隆英：熱弾性応力計測に基づく鋼構造のき裂進展性評価，第70回土木学会年次学術講演会，2015.9
- 8) 中山和真，越野勝，花井拓，阪上隆英，塩澤大輝，和泉遊以：鋼床版支点部補剛材に生じた亀裂の補修，第71回土木学会年次学術講演会，2016.9
- 9) 藤本泰成，溝上善昭，花井拓，阪上隆英，塩澤大輝，東智之，和泉遊以：熱弾性応力計測による鋼構造の疲労き裂補修対策実施効果の検証，第71回土木学会年次学術講演会，2016.9