

特集：非破壊検査技術の最新動向

赤外線カメラによる目視を超えた鋼橋の非破壊評価技術

神戸大学大学院工学研究科
阪上 隆英

1. はじめに

橋梁等インフラ構造物の経年化が問題となっている。経年化鋼橋の構造健全性保証においては、疲労亀裂対策が重要となる。図1は、鋼橋のライフサイクルにおける、疲労亀裂に対する非破壊評価の必要性を示している。疲労亀裂発生前においては、疲労亀裂発生の可能性や発生位置を推定できることが望ましい。疲労亀裂発生後には、的確に疲労亀裂を検出し、その進展状況をモニタリングする技術が必要となる。また、疲労亀裂進展に対しては、亀裂進展速度の推定とこれに基づく余寿命評価が必要である。さらに、疲労亀裂進展が相当量に及んだ段階では、構造物の補修・補強が行われるが、その完了後にはこれらが適切に行われたか否かの評価や亀裂再発生の可能性の評価が必要となる。

これまでに用いられてきた非破壊試験技術には、足場などの設置による構造物への接近が必要なこと、時間、労力、コストを要することに加え、構造物の構造健全性を直接評価できないという問題がある。筆者¹⁾は、これまでに、鋼橋のライフサイクルにおける疲労亀裂の非破壊評価手法として、赤外線カメラを用いた種々の計測・評価法を開発してきた。

本稿では、まず、最近進歩が著しい赤外線カメラの開発動向について簡単に述べる。次に、赤外線カメラを適用した鋼橋の疲労亀裂に対する非破壊評価の事例として、筆者が所属する神戸大学と本州四国連絡高速道路(株)および滋賀県立大学の共同研究プロジェクトで得られた研究成果の一部を紹介する。

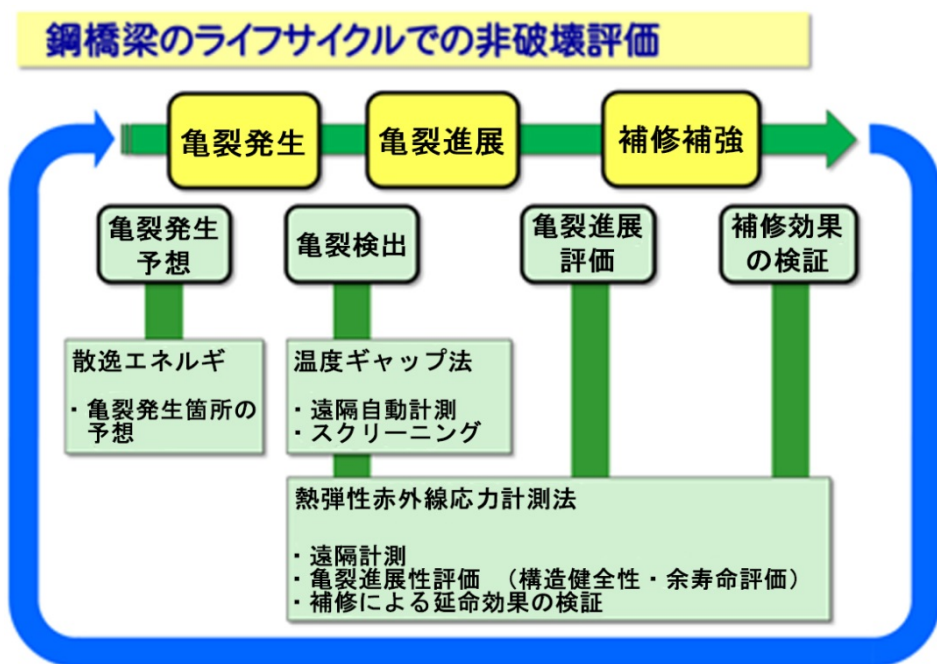


図1 鋼橋梁のライフサイクルでの非破壊評価

2. 最近の赤外線カメラの開発動向

優れた赤外線センサの開発とデジタル信号処理技術の進展を背景に、これまで赤外線カメラは進歩を遂げてきた²⁾。初期の赤外線カメラは、単一あるいは少数の赤外線センサと二次元光学走査機構の組合せによるものであったが、量子型アレイセンサの開発により、赤外線カメラの分解能および計測速度は飛躍的に向上した。その後、非冷却赤外線アレイセンサの進歩は、赤外線カメラの小型・軽量化および低価格化に大きく貢献した。さらに最近では、赤外線カメラモジュールの開発が急速に進んできており、赤外線カメラの一層の小型・軽量・低価格化が進行している。現在、製造・市販されている赤外線カメラおよび赤外線サーモグラフィの一部について、それらの仕様をまとめたものを表1に示す。

表1 最近の赤外線カメラの仕様

	赤外線センサ	画素数	検出波長(μm)	センサの冷却	温度分解能NETD(K)	計測速度(Frames/s)	重量(g)	製造国
A	InSb	1920×1536	3.6~4.9	要	0.03	100	4700	ドイツ
	InSb	1280×1024	1.5~5.1	要	0.02	180	5050	アメリカ
	InSb	640×512	3~5	要	0.018	125	2300	アメリカ
B	マイクロボロメータ	1024×768	7.5~14	不要	0.02	30	1900	アメリカ
	マイクロボロメータ	640×480	8~14	不要	0.025	30	1300	日本
C	マイクロボロメータ	640×512	7.5~13.5	不要	0.05	60	72	アメリカ
	マイクロボロメータ	640×512	7.5~13.5	不要	0.04	60	7.5	アメリカ

分類 A は、量子型赤外線センサを搭載した高性能な機種であり、赤外線センサの画素数、最小検知温度差（温度分解能）および計測速度のすべてにおいて最高水準にある。高感度故に、インテグレーションタイム（デジタルカメラにおけるシャッタースピードに相当）を 1ms 程度に短くできるため、フレーミング速度（デジタルカメラの連写枚数に相当）も高くなり、動く物体や過渡現象の計測に適している。分類 B は、非冷却マイクロボロメータ赤外線アレイセンサを搭載した機種である。マイクロボロメータの性能が飛躍的に向上し、最近では、量子型センサに迫る優れた最小検知温度性能を有する赤外線カメラが開発されている。非冷却センサの使用によりセンサを冷却するための機構が不要となったことから、赤外線カメラを小型軽量・低価格化することが可能となり、赤外線サーモグラフィの様々な科学技術分野への一層の普及が実現した。特に、現場での使用に最も適した機種として、プラント設備診断や構造物の維持管理に広く用いられている。分類 C は、装置単独での画像表示機能を省略した赤外線カメラである。一層の小型化を実現しているため、様々な機器に「赤外線目」として実装することができるほか、UAV（ドローン）への搭載による検査機器の開発など、多くの応用が考えられ、今後需要が高まっていくものと思われる。

3. 赤外線カメラを用いた温度ギャップ法による疲労亀裂検出

温度ギャップ法は、図2に示すような、道路橋鋼床版のデッキプレートとUリブ間の溶接ビードに発生するビード貫通亀裂の検出を主な目的として開発された手法である³⁾。鋼床版では、路面が日射を受けた際に、熱が舗装を介してデッキプレート上面に伝わりデッキプレートの温度が上昇する。

さらに、デッキプレートから溶接接合されている U リブに対して、溶接部を經由して熱伝導が行われ、デッキプレートから U リブに温度勾配が発生する。この時、デッキプレートと U リブとの溶接部に亀裂があれば、亀裂部の微小な空隙により熱伝導が阻害されるため、鋼材表面の温度分布に乱れが生じる。温度ギャップ法は、この乱れ（温度ギャップ）を赤外線カメラにより検出することで、亀裂を検出する手法である。

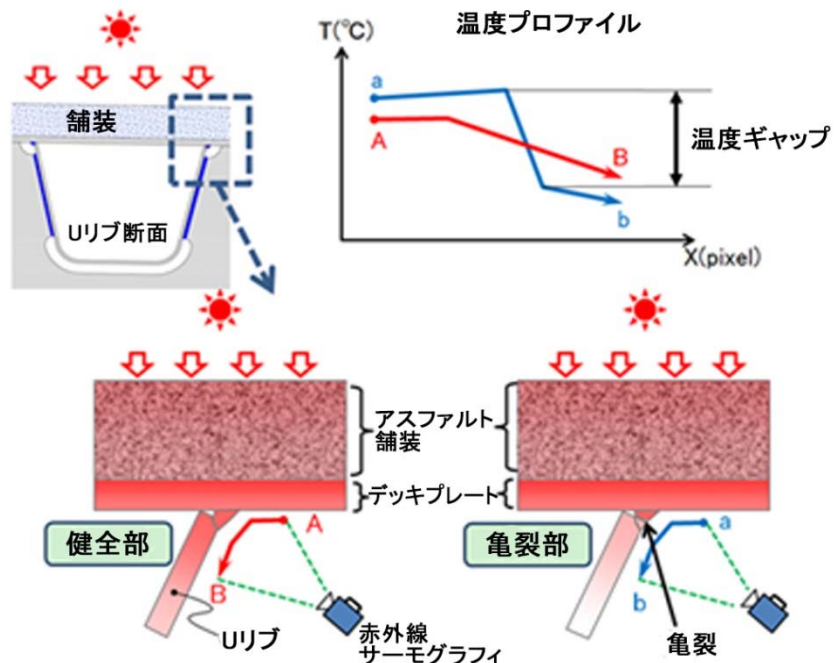


図 2 温度ギャップ法

温度ギャップ法による亀裂検出例を示す。試験計測を実施した橋梁は、連続鋼床版箱桁橋である。計測橋梁の主桁断面と構造詳細を図 3 に示す。計測においては、張出部に設置されている移動作業車に赤外線カメラを 3 台搭載し、大型車の輪荷重を受ける直下のデッキプレートと U リブ溶接線を撮影した。計測には、マイクロボロメータアレイセンサを搭載した赤外線カメラ（日本アビオニクス InfReC R300SR：温度分解能 0.03°C）を用いた。作業車を橋軸方向に 0.25m/秒の速度で走行させながら、延長 10km の溶接線の検査を 1.5 日間で完了した。

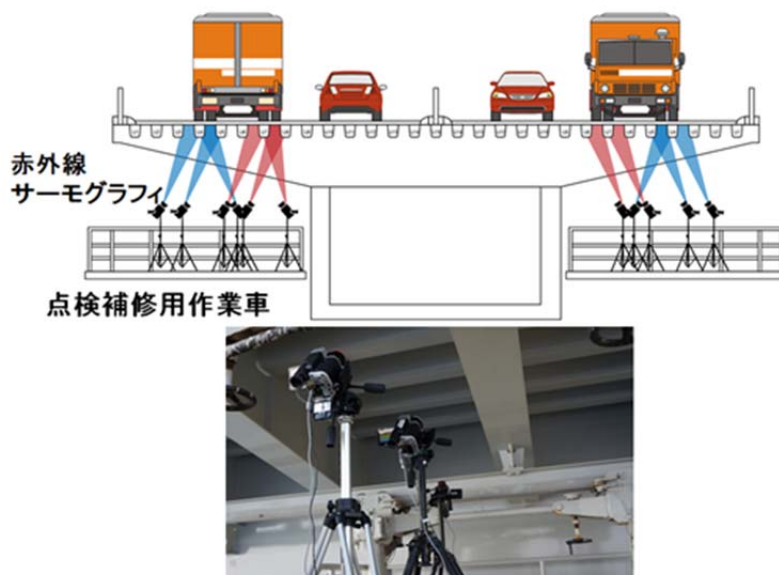


図 3 温度ギャップ法による試験状況

試験結果の一例を図 4 に示す。可視画像中に破線で示した領域の赤外線画像が左に示され、ライン A および B のラインプロファイルが下の図に示されている。赤外線画像には温度ギャップが局所的低温部として現れており、亀裂部と健全部に明確な温度勾配の違いが見られ、これをもとに疲労亀裂を検出することが可能である。

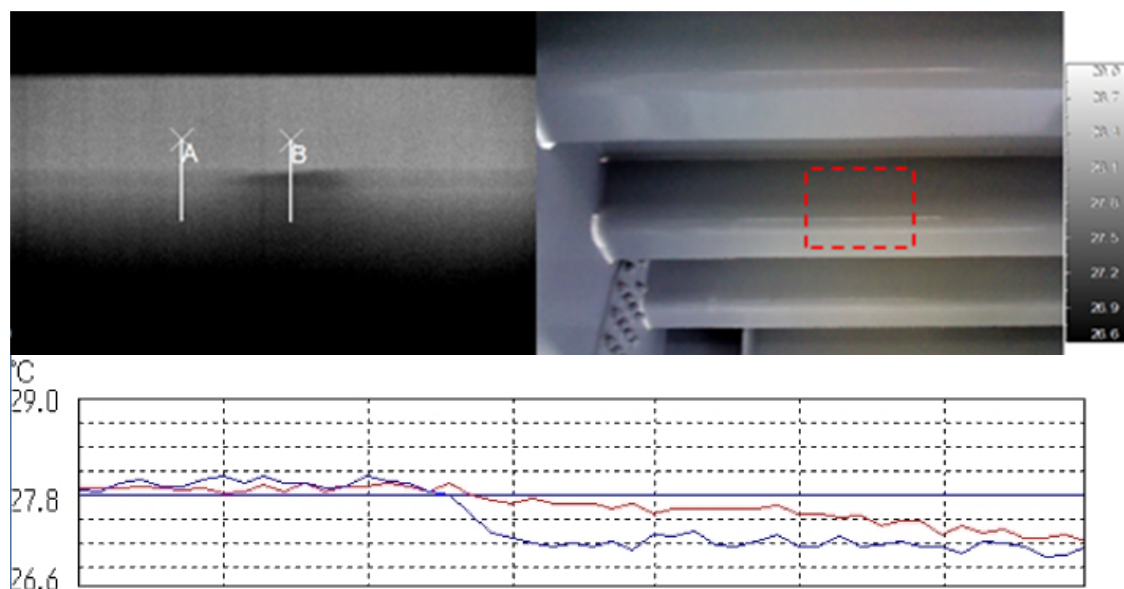


図 4 温度ギャップ法による試験結果

温度ギャップ法の最近の進展としては、実用化システムの開発が挙げられる。鋼床版の車線総延長が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前述のような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行っている⁴⁾。図 5 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を行っていた。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、温度ギャップ法のデータ解析・閲覧システムを新たに開発し、「亀裂」と「亀裂以外の外乱（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図 6 に示すようなシステムを開発した。



図 5 温度ギャップ法撮影・録画システム（本四まもる君）

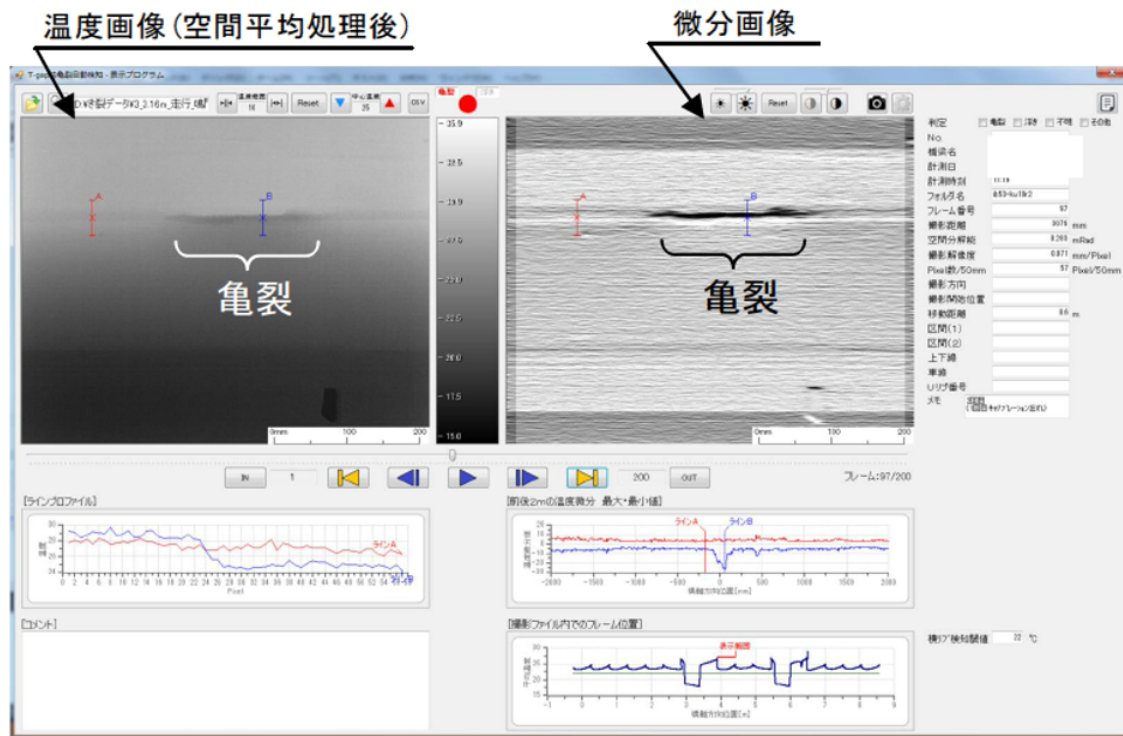


図6 温度ギャップ法のデータ解析・閲覧システム

4. 熱弾性応力計測に基づく疲労亀裂の非破壊評価

経年鋼構造物の構造健全性を保証するためには、疲労亀裂を検出するとともに、疲労亀裂による強度低下や疲労亀裂進展性の評価が重要となる。筆者ら^{6), 7)}は、赤外線サーモグラフィを用いた遠隔・非接触での熱弾性応力測定に基づく、疲労亀裂の非破壊評価手法を開発した。熱弾性応力測定によれば、供用下の鋼橋梁に車両輪荷重が作用する時の、疲労亀裂先端近傍における特異応力場を計測することにより、亀裂を遠隔から検出・定量評価することが可能となる。さらに、疲労亀裂周辺の実働応力変動を計測することができるため、疲労亀裂の進展性さらには残存寿命を直接評価できる可能性がある。

4.1 熱弾性応力測定法

熱弾性応力測定法について簡単に説明する。材料が弾性範囲内で荷重を受ける場合、荷重の繰返し速度が断熱条件を満たす程度に十分大きければ、主応力の変化 $\Delta\sigma$ と温度変化 ΔT との間には、次式で示す関係が成立する。すなわち、図7に示すように、引張応力作用下では温度降下が、圧縮応力作用下では温度上昇が起こる。

$$\Delta T = -K_m \cdot T \cdot \Delta\sigma \quad (1)$$

ここで ΔT は温度変化量、 K_m は熱弾性係数、 T は絶対温度、 $\Delta\sigma$ は主応力の変化量である。赤外線サーモグラフィを用いて温度変化量 ΔT を測定することで、主応力の変化量 $\Delta\sigma$ の分布を得ることができる。

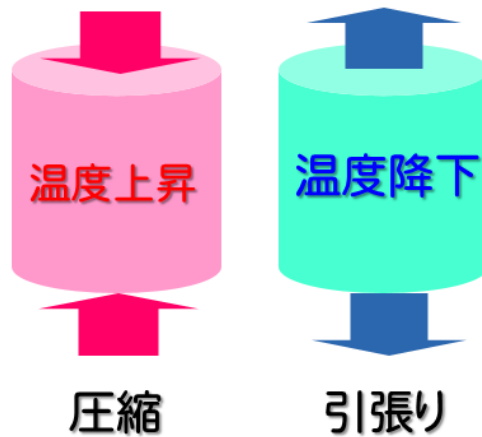


図7 熱弾性効果

4.2 熱弾性応力計測に基づく鋼構造の亀裂進展性評価

鋼構造部材の溶接部に発生した疲労亀裂を対象として、疲労亀裂の進展性と実働応力の関係を求め、疲労亀裂の進展予測の可能性について検討した。実験室レベルでの板曲げ振動試験における熱弾性応力計測結果をもとに算出された応力拡大係数と亀裂進展速度との関係を求めた⁸⁾。

本研究で用いた試験体は図8に示すような、橋梁鋼床版のデッキプレートと垂直補剛材の溶接部をモデル化した面外ガセット溶接継手試験体である。試験体には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た。試験条件として $R=-\infty$ 、初期応力範囲を 80MPa とした。亀裂進展過程での亀裂の表面長さを正確に測定するため、振動数 50000 回毎に磁粉探傷を行った。亀裂が発生し、溶接止端部から 30mm の位置まで伸びたところまで試験を行った。熱弾性応力計測結果から求められた応力拡大係数と亀裂進展速度との関係を図9に示す。応力拡大係数が大きくなるにつれて亀裂の進展速度が大きくなる相関が得られ、赤外線応力計測結果から算出される応力拡大係数をもとに、亀裂の進展性を評価できることを確認することができた。

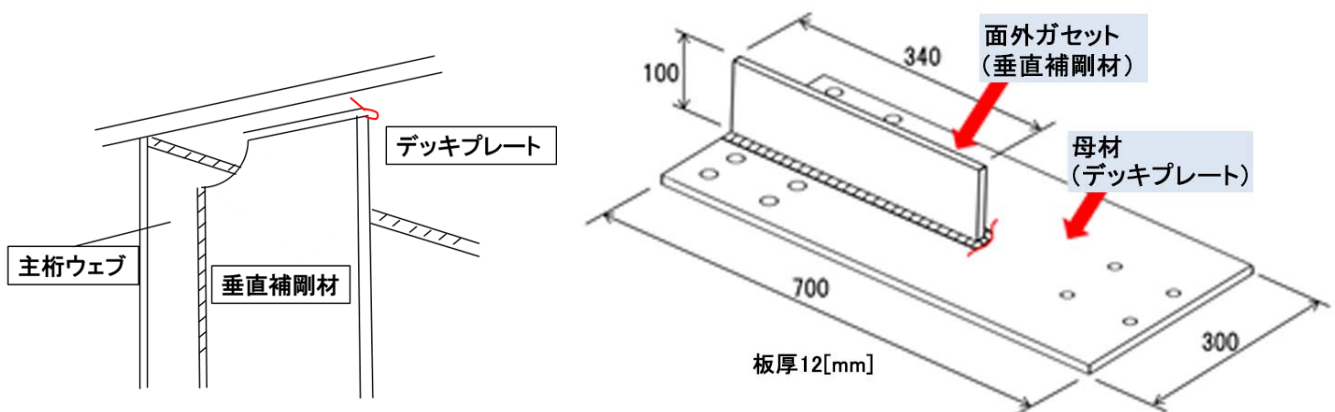


図8 面外ガセット溶接継手試験体

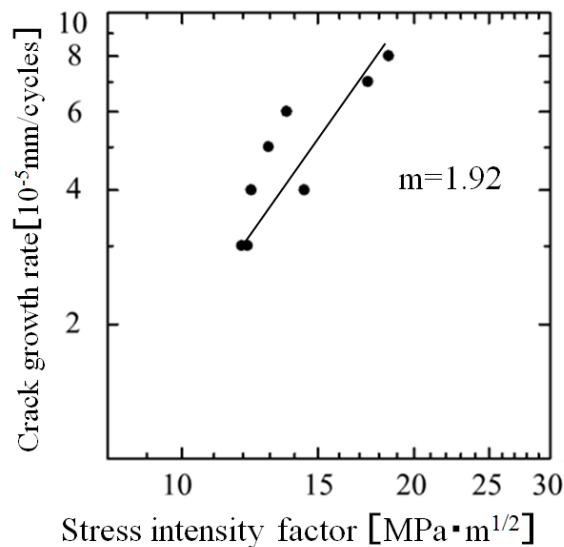


図9 熱弾性応力計測結果から求められた応力拡大係数と亀裂進展速度との関係

5. 補修・補強効果の検証

疲労亀裂の補強・補修対策としては、SFRC 舗装や当て板補強等による作用応力の低減、ストップホール施工やピーニングによる亀裂先端や表面の処理が行われている。何らかの補強・補修が行われた場合には、その前後での疲労亀裂存在部の実働応力分布を計測・比較し、必要に応じて応力分布に基づく構造健全性の再評価を実施することにより、補強・補修による構造物の延命効果のその場検証を行うことが可能となるものと考えられる。ここでは、図10に示すような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）に発生した疲労亀裂を対象とし、疲労亀裂の補修を行った前後に、熱弾性応力測定を行うことで、補修による応力低減効果を検証した結果を示す⁹⁾。

補修対策としては、ウェブギャップ板の溶接部に集中する応力を当て板に分担させる、図11に示すような当て板補修を施した。その際には、当て板に確実に応力を負担させることができるように、当て板と横桁下フランジをボルトで固定する構造とした。また、当て板には、亀裂周辺の赤外線計測のための観測孔を設けた。熱弾性応力測定に際しては、総重量約 200kN の荷重車が計測箇所直上の車線を 80km/h で通過した際の熱弾性温度変動を赤外線サーモグラフィにより計測した。

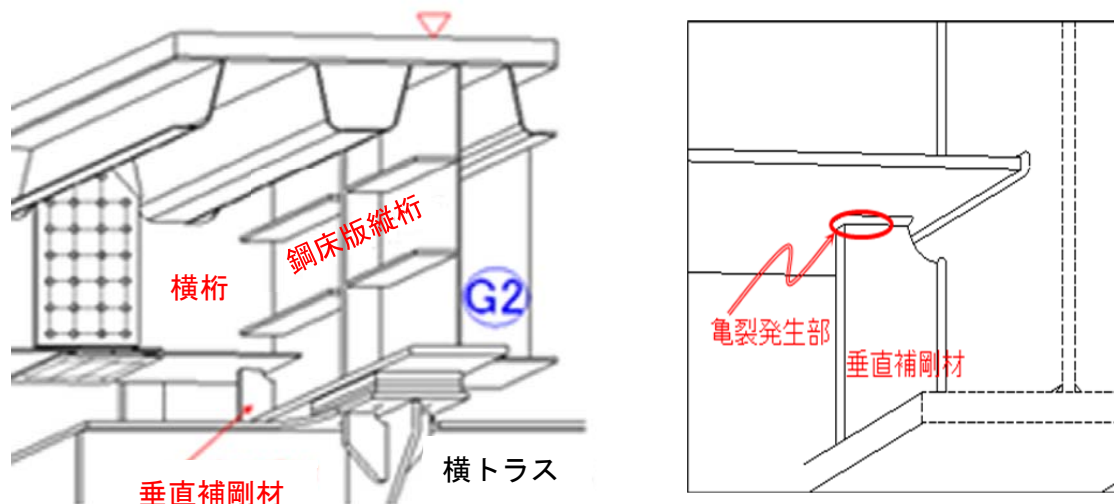


図10 ウェブギャップ板

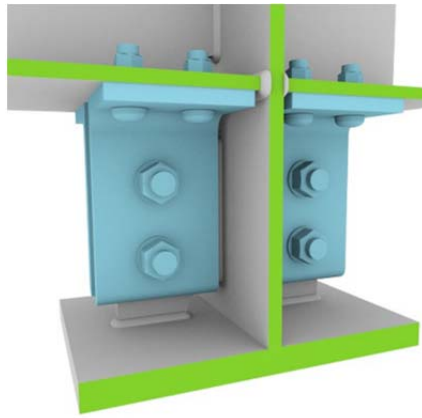
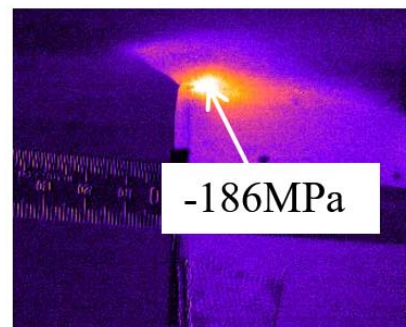
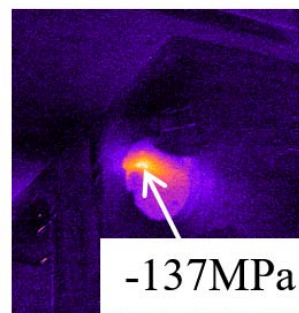


図 11 ウェブギャップ板の当て板補修

当て板補修の前後におけるウェブギャップ板の写真と応力変動の分布画像を図 12 に示す。図より、亀裂先端での応力集中は補修前後で見られるものの、全計測点で作用応力が減少していることがわかる。応力の減少率は 25~30%程度であり、当て板補修の効果が確認できた。次に、補修による亀裂進展抑制効果を定量的に評価するために、応力拡大係数範囲 ΔK を算出した。その結果、 ΔK は $14.2 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ から $10.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ に減少していることがわかった。



補修前



補修後

図 12 熱弾性応力測定による当て板補修効果の検証結果

6. おわりに

本稿では、鋼橋のライフサイクルにおける疲労亀裂の非破壊評価手法として、近年進展が著しい赤外線カメラを用いた計測・評価法を紹介した。(1) 疲労亀裂の簡便な検出法として温度ギャップ法を紹介し、現場における適用事例の一部を示した。(2) 熱弾性応力計測に基づく疲労亀裂の検出ならびに疲労亀裂周りの応力分布評価法を紹介し、疲労亀裂検出ならびに応力拡大係数評価事例を示した。

(3) 補修効果の検証事例として、当て板補修前後における熱弾性応力分布計測結果から疲労亀裂補修効果の検証を行った結果を示した。

本稿で紹介した一連の研究遂行にあたり、神戸大学塩澤大輝准教授、滋賀県立大学和泉遊以助教、本州四国連絡高速道路(株)の研究者の皆様のご協力を得た。また一部に、日本学術振興会科学研究費補助金基盤研究(B)による援助を受けた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) Sakagami, T.: Remote nondestructive evaluation technique using infrared thermography for fatigue cracks in steel bridges, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Volume 38, Issue 7, 2015, pp.755–779.
- 2) 阪上隆英：赤外線計測の原理と基礎，画像ラボ，24，2013，pp.28–32.
- 3) 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ーUリブ間の溶接部に生じる疲労亀裂の遠隔検出，*JSSC 鋼構造論文集*，22，2015，pp.47–56.
- 4) 溝上善昭，奥村淳弘，大藤時秀，和泉遊以，阪上隆英：赤外線サーモグラフィを用いた温度ギャップ法によるUリブ鋼床版のビード貫通亀裂の自動検出と装置開発，*構造工学論文集*，Vol.64A，2018，pp.573–582.
- 5) 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講演概要集，2016，pp.1419–1420.
- 6) 阪上隆英，西村 隆，久保司郎，崎野良比呂，石野和成：自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔非破壊検査技術の開発(第1報 溶接試験片を用いた基礎的検討)，*日本機械学会論文集 A 編*，72，2006，pp.1860–1867.
- 7) 阪上隆英：疲労き裂の検出技術，第11回鋼構造と橋に関するシンポジウムー鋼橋の予防保全への挑戦ー日本の橋を守るための取り組み論文報告集，2008，pp.93–102.
- 8) 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，*土木学会第70回年次学術講演会講演概要集*，2015，pp.777–778.
- 9) Sakagami, T., Mizokami, Y., Shiozawa, D., Fujimoto, T., Izumi, Y., Hanai, T., Moriyama, A.: Verification of the repair effect for fatigue cracks in members of steel bridges based on thermoelastic stress measurement, *Engineering Fracture Mechanics*, 183, 2017, pp.1–12, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2017.05.024>

<略歴>

阪上 隆英 (さかがみ たかひで)

1988年 大阪大学 大学院 工学研究科 博士後期課程 修了
工学博士

1988年 大阪大学 基礎工学部 助手

1994年 大阪大学 工学部 助教授

2009年 神戸大学 工学研究科 教授

現在に至る