

自己相関ロックインサーモグラフィ法による経年鋼構造物の疲労き裂の遠隔検出に関する研究

研究代表者 大阪大学大学院工学研究科 准教授 阪上隆英
共同研究者 大阪大学大学院工学研究科 教授 久保司郎

1. 緒言

近年高度成長期に建造された構造物の経年化問題が深刻化している。構造物が設計寿命を超えて使用される場合が多く、以前にも増してこれらの保守検査が必要不可欠となっている。特に経年鋼構造物における構造健全性を保証するためには、疲労によるき裂発生・進展を的確にモニタリングすることが重要となる。しかしながら、供用中の大型鋼構造物に対しては、検査のための足場が必要、稼動中の検査ができない、効率的な検査法がないなど、一般に構造健全性を担保するために必要な非破壊試験を行うことは容易ではない。

構造物を遠隔から非接触に検査できる手法として、赤外線サーモグラフィによる温度分布測定に基づく非破壊検査手法が注目され、構造物の保守検査に関する適用事例が報告されている。構造部材に存在する応力集中部あるいはき裂を検出・計測する一つの方法として、ロックイン赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性温度変動の測定がある。この方法の特徴としては、全視野測定を行うことができるため、熱弾性温度変動分布画像をもとに応力集中部あるいはき裂先端近傍の特異応力場を検出できることが挙げられる。このため、ひずみゲージあるいは超音波法などの点測定による検査方法よりも効率的にき裂の検出・計測を行うことができると考えられる。ロックイン赤外線サーモグラフィにより、疲労損傷評価を行った事例が、これまでに報告されている^{1,2)}。

き裂状欠陥を有する平板の応力分布を、ロックイン赤外線サーモグラフィにより計測した一例を示す。幅 80mm、長さ 450mm、板厚 6mm のアルミニウム合金平板中に存在する、長さ 16mm の中央き裂周辺の応力分布の測定結果を Fig. 1 に示す³⁾。中央き裂の両端には、き裂先端の特異応力場による顕著な応力集中が見られる。また、中央き裂の上下には圧縮応力の集中域も検出されている。このような、き裂周辺の応力場の特徴をもとに、き裂の検出が可能となる。

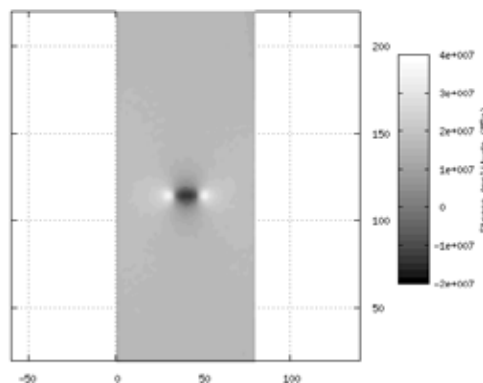


Fig. 1 Stress distribution around through-thickness crack obtained by lock-in thermography.

熱弾性応力計測においては、赤外線サーモグラフィの計測分解能と同程度の微小な温度変動を計測するため、赤外線サーモグラフィによる温度変動計測データから一定周波数の負荷荷重変動に同期する信号のみをロックイン処理により抽出する信号ノイズ比改善が行われてきた。このため、従来型のロックイン赤外線サーモグラフィには、ひずみゲージやロードセルなどによる負荷荷重変動に関する外部参照信号を入力する必要があった。

しかしながら、遠隔から大型鋼構造物の応力集中部やき裂の検出を行う場合には、負荷荷重信号を引き出すことが不可能な場合が多く、仮に参照信号を引出せたとしても遠隔非接触測定が可能な赤外線サーモグラフィの利点を活かすことができない。また、荷重負荷形態もランダム負荷の場合がほとんどである。このような理由により、本研究で開発を行う疲労き裂の遠隔計測のためには、従来のロックイン赤外線サーモグラフィを適用することができない。そこで著者ら⁴⁾は、負荷荷重変動に関する参照信号を外部から入力することなく、またランダムな荷重変動に適応できる自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィを開発した。この手法では、計測対象の一部領域の赤外線計測データから参照信号を自己生成し、これをもとに全領域の赤外線データのロックイン処理を行っている。

本研究では、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィを道路構造物の鋼床版に適用し、鋼床版に発生・進展している疲労き裂の遠隔検出の可能性を検討した。

2. 自己相関ロックインサーモグラフィ

き裂を有する部材に繰返し応力が作用する場合には、き裂先端付近においては、特異応力場により応力変動が周辺よりも大きくなる。き裂先端付近と遠方応力作用部における変動波形が相似であり、位相差がほとんど生じていなければ、ロックイン処理に用いる参照信号として、遠方応力が作用する部分から取得した赤外線強度変動波形の信号を使用することができる。これにより、外部から荷重信号を取得することなしに、ロックイン処理を行うことができる。

供用中の橋梁に対して、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法によるき裂検出を行う場合、熱弾性温度変動の原因となる繰返し荷重は、橋梁を走行する車両から受ける輪荷重である。したがって、熱弾性温度変動のロックイン処理方法を、ランダムな荷重に対応させる必要がある。本手法では、ランダム荷重に対応したロックイン処理として、最小二乗近似法を用いた。以下にその方法の概要を示す。

物体に f という信号を持つ負荷荷重がかかっている場合を考える。この時、熱弾性温度変動により物体から発せられる赤外線強度 y_n は、以下のような式により近似できる。以下に示す n はフレーム番号を表しており、 N は全フレーム数を表している。

$$Y_n = A + Bf_n \quad (1)$$

ここで、 Y_n は赤外線強度の近似値、 f_n は視野内において指定した部分の参照信号を表している。 Y_n と y_n の差の二乗和を最小にするという条件のもとに、係数 A および B を決定すると、 B は以下のように求められる。

$$B = \frac{\begin{vmatrix} N & \Sigma y_n \\ \Sigma f_n & \Sigma y_n f_n \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} N & \Sigma f_n \\ \Sigma f_n & \Sigma (f_n)^2 \end{vmatrix}} = \frac{N \Sigma y_n f_n - \Sigma y_n \Sigma f_n}{N \Sigma (f_n)^2 - (\Sigma f_n)^2} \quad (2)$$

赤外線サーモグラフィで得られる全ピクセルの赤外線強度変動データに対して計算を行うことにより、自己生成された参照信号と最も相関の高い赤外線強度変動値を抽出することができる。係数 B は、熱弾性温度変動値の参照信号に対する相対的な比、すなわち参照信号を自己生成するために用いた領域での作用応力に対する比を表す。したがって、係数 B の分布を画像化することにより、相対応力分布画像を求めることができる。

3. 溶接試験片のき裂モニタリング

長さ 450mm、幅 100mm、厚さ 14mm の鋼板の両面にリブを隅肉溶接した試験片（母材：SM490B、溶接金属：MG55）に対して実験を行った。繰返し荷重を試験片に負荷し、試験片の溶接部近傍の応力集中部に疲労き裂を発生・進展させた。荷重負荷条件は、応力振幅 100MPa、荷重周波数 10Hz とした。測定では荷重周波数を 10Hz、5Hz、1Hz、0.5Hz、応力振幅を 25MPa、50MPa、75MPa、100MPa とし、荷重波形は正弦波状の波形とした。

繰返し荷重負荷の下で、疲労き裂が進展していく様子を測定した。結果を Fig. 2 に示す。き裂が短い場合には、き裂の中央部分の圧縮応力域（負位相）が検出されている。き裂が長くなると、き裂先端近傍に顕著な応力集中部が検出されている。これらをもとに、き裂の検出およびモニタリングが可能であることが明らかになった。

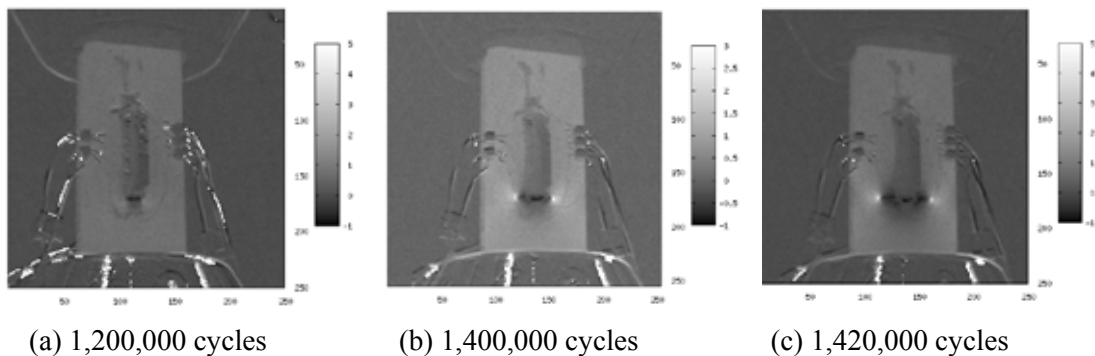


Fig. 2 Results of self reference lock-in measurement in crack propagation test.

4. 実構造模擬試験体への適用

実構造物に近い試験体として、道路橋梁を模擬した試験体を用いて、疲労き裂検出を行った⁵⁾。試験体の写真を Fig. 3 に示す。試験体寸法は縦 400mm、横 625mm、長さ 4000mm、鋼板の厚さは 8mm である。試験体に対して荷重 19.6kN から 68.6kN の三点曲げ負荷を与えた際の熱弾性温度変動計測に基づき疲労き裂検出を行った。測定時の荷重周波数は 5Hz である。Fig. 3 に示した C 部および D 部に存在するき裂の測定を行った結果を Fig. 4 に示す。この場合にも、き裂先端近傍の特異応力場による応力集中部位からき裂を検

出ることができ、本手法の有用性が確認できた。

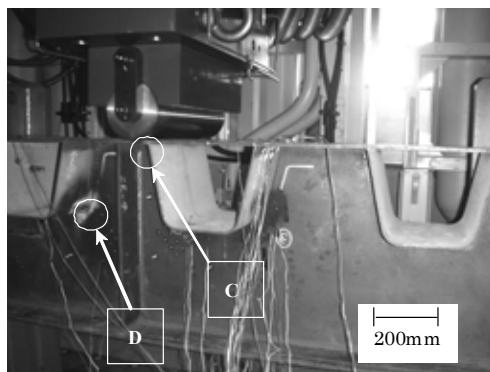


Fig. 3 Steel deck test sample for crack propagation test.

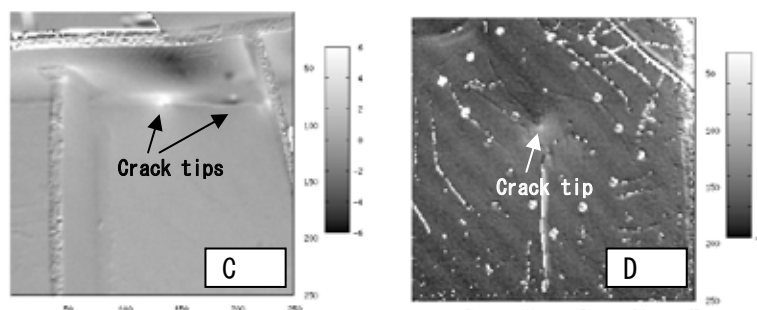


Fig. 4 Results of crack detection by self-reference lock-in thermography.

5. デッキ貫通疲労き裂の検出

溶接ビード貫通型など、き裂が検査可能な表面に開口している場合には、目視あるいは磁粉探傷などの非破壊検査手法により検出が可能である。これに対し、トラフリブの裏側を基点としてデッキプレート側に進展する疲労き裂は検査可能な表面にき裂が開口していないため、超音波探傷など内部欠陥に有効な検査手法が用いられてきた。しかしながら、き裂発生が予測される箇所すべてに対して超音波探傷を行うことは事実上不可能であり、効率的な非破壊試験方法の開発が急務となっている。

鋼床版に発生・進展するデッキプレート貫通型の疲労き裂検出に対する自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の適用性を検討するため、鋼床版を模した試験体を用いた疲労試験においてき裂検出実験を実施し、得られた計測結果を超音波探傷試験と比較検討した⁶⁾。

試験対象とした鋼床版試験体を Fig. 5 に示す。試験体のデッキプレートおよびトラフリブの厚さは、それぞれ 19mm および 6mm であった。試験体には最小荷重 10kN、最大荷重 110kN、振動数 9Hz の圧縮の繰返し荷重を計 200 万回負荷した。その間のある一定載荷回数ごとに、負荷荷重による応力変動に伴う赤外線強度変動を、赤外線サーモグラフィで測定した。毎秒 113 フレームで測定した時系列赤外線データに対して自己相関ロックイン処理を施し、き裂による応力集中部の検出を行った。

Fig. 5 に示した A 部のデッキプレートとトラフリブ間の溶接部に対して自己相関ロッ

クイン赤外線サーモグラフィによる計測を行った。繰返し荷重開始直後においては、溶接部にあまり顕著な応力集中は見られなかったが、荷重回数の増加に伴い溶接部に相対応力値が局所的に高くなる部分が見られるようになり、その位置は横リブ交差部から遠ざかるようになった。この応力集中部は、デッキプレート、トラフリブおよび横リブの交差点を起点に、デッキプレート上部に進展している半楕円裏面き裂の前縁における高い応力集中部の影響が計測面に現れたものと考えられる。200万回荷重時に自己相関ロックイン処理により得られた相対応力分布画像を Fig. 6 に示す。荷重回数 50 万回, 100 万回および 200 万回における、横リブ交差部から応力集中部までの距離と、超音波探傷により求められたき裂先端から横リブまでの距離を Table 1 に示す。応力集中部の位置と、超音波探傷により求められたき裂前縁の位置は良く一致している。したがって、自己相関ロックインサーモグラフィ法により、デッキ貫通型き裂の検出および半楕円裏面き裂の前縁の位置の推定が可能であることが分かった。

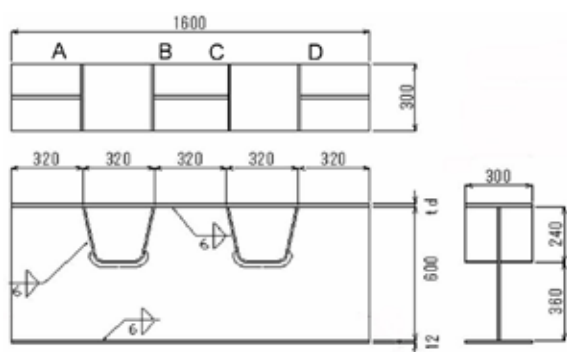


Fig. 5 Steel deck test sample

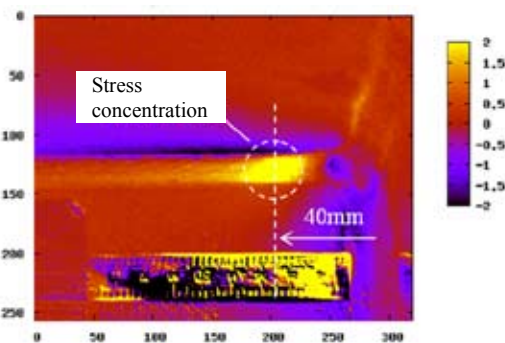


Fig. 6 Results of crack detection by self-reference lock-in thermography.

Table 1 Comparison of crack locations between infrared testing and ultrasonic testing.

Loading	Crack location obtained by self-reference lock-in thermography	Crack location obtained by ultrasonic testing
500,000	-	17mm
1,000,000	35mm	34mm
2,000,000	40mm	40mm

6. 実橋梁における疲労き裂検出

実橋梁の鋼床版に発生した疲労き裂を、供用中の車両走行による輪荷重負荷による熱弾性温度変動をもとに検出できるかどうかを検証した⁵⁾。都市高速道路の3径間連続鋼床版箱桁橋に発生した疲労き裂に対して自己相関ロックイン計測を行った。測定箇所の一例を Fig. 7 に示す。疲労き裂は溶接部を起点に両側に伸びている。140Hz, 2000 フレームの時系列赤外線計測を繰返し行い、大型車の通過により熱弾性温度変動が顕著に見られた時間の時系列赤外線データを切り出し、各々のデータに対して自己相関ロックイン処理を行った。さらに得られた自己相関ロックイン解析値を平均化することでノイズ改善を行った。測定対象とした溶接部の測定結果を Fig. 8 に示す。溶接部から両側に伸

びている疲労き裂の先端で顕著な応力集中部を示すコントラスト変化が得られていることがわかる。この実験から、供用中の車両走行による輪荷重負荷による熱弾性温度変動を自己相関ロックイン計測することにより、鋼床版の疲労き裂を遠隔から非破壊・非接触検出できることが明らかになった。



Fig. 7 Crack detection in actual steel bridge.

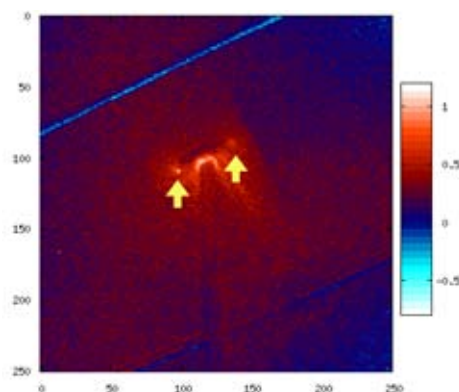


Fig. 8 Result of crack detection.

7. 結言

本研究では、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィを道路構造物の鋼床版に適用し、鋼床版に発生・進展している疲労き裂の遠隔検出の可能性を実験的に検討した。その結果、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィにより、実用上十分な精度で鋼構造物中の疲労き裂を遠隔から検出できることが明らかになった。本研究成果は、道路構造物のみならず、クレーンをはじめとする疲労き裂の問題が懸念されるあらゆる溶接鋼構造物の維持管理に活用できるものと考えられる。

本研究の遂行にあたり、研究経費の一部にJFE 21世紀財団からの助成金を使用した。ここに記して感謝の意を表する。

文献

- 1) Bremond, P. et al., Lock-in Thermography: A Tool to Analyze and Locate Thermo-Mechanical Mechanisms in Materials and Structures, Proceedings of SPIE, Vol.4360, (2001), pp.560-566.
- 2) Honda, T. and Kitsunai, Y., An Attempt of Fatigue Crack Monitoring by Means of Infrared Stress Analysis System, Proceedings of the 1st Symposium on Thermographic NDT & E Techniques, (1995), pp.151-154.
- 3) Sakagami, T. et al., Experimental Stress Separation Technique Using Thermoelasticity and Photoelasticity and Its application to Fracture Mechanics, JSME International Journal, Series A, Vol.47, No.3 (2004), pp.298-304.
- 4) 阪上隆英, ほか 4 名: 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，日本機械学会論文集 A72-724，(2006)，pp.1860-1867.

5) 阪上隆英，ほか 4 名：自己相関ロックインサーモグラフィによる鋼床版の疲労き裂遠隔検出技術，土木学会第 61 回年次学術講演会講演概要集，(2006)，pp.1171-1172.

6) 阪上隆英，ほか 4 名：自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィによるデッキ貫通疲労き裂検知，土木学会平成 20 年度全国大会講演概要集，(2008)，pp.937-938.