

赤外線サーモグラフィによる疲労き裂の検出技術

Nondestructive Inspection Techniques for Fatigue Cracks by Infrared Thermography

阪上 隆 英 *

Takahide Sakagami

ABSTRACT A new remote nondestructive inspection technique, based on thermoelastic temperature measurement by infrared thermography, is developed for evaluation of fatigue cracks propagated from welded joints in steel bridges. Fatigue cracks are detected from localized high thermoelastic temperature change at crack tips due to stress singularity under variable loading from traffics on the bridge. Self-reference lock-in data processing technique is developed for the improvement of signal / noise ratio in the crack detection process. Thermoelastic stress analyses in the vicinity of crack tips are carried out, after the crack detection process. Stress distribution under variable loading by the traffic is measured by the infrared thermography. Stress intensity factors K_I and K_{II} are obtained from measured stress distribution. It is found that these fracture mechanics parameters can be evaluated in the reasonable accuracy by the proposed technique.

Key Words: 非破壊評価, 熱弾性効果, 赤外線サーモグラフィ, 応力拡大係数, 疲労き裂, 鋼床版

Nondestructive Evaluation, Thermoelasticity, Infrared Thermography, Stress Intensity Factor, Fatigue Crack, Steel Bridge

1. まえがき

経年鋼橋梁の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、供用中の鋼橋梁に対しては、検査のための足場が必要、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。疲労センサと呼ばれる試験片を実構造物に装着し、構造物に作用する荷重により疲労センサに発生・進展する疲労き裂をモニタリングすることにより、構造物の予防保全ならびに健全性評価を行う手法も提案されているが、遠隔から広範囲をモニタリングできる効率的な検査法は実現されていない。

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。

*工博 大阪大学准教授 大学院工学研究科機械工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

一例として、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結果を示す。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図-1 に示す。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。

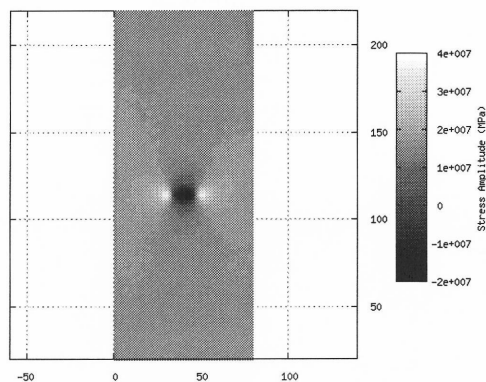


図-1 き裂先端付近の応力分布

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。そこで著者ら⁽¹⁾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。

本報においては、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィにより、鋼床版に存在する疲労き裂を検出した事例を紹介する⁽¹⁻⁵⁾。さらに、橋梁上を大型車が通過することにより、比較的大きな載荷が鋼床版になされた際には、赤外線強度変動の値や波形についても、十分な精度で求められることがある。このような場合には、車両通過時の輪荷重によって発生する、疲労き裂周辺での応力変動の分布を、赤外線サーモグラフィにより計測できるため、これに基づき破壊力学パラメータを算出できる。そこで、赤外線サーモグラフィにより計測されたき裂周辺の応力分布から応力拡大係数 K_I 、 K_{II} を算出し、その妥当性の検討を行った⁽⁶⁾。

2. 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ⁽¹⁾

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⁽⁹⁾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. 溶接試験片に対する実験結果

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⁽¹⁾。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。

3.1 き裂進展モニタリング

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。結果を図-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。

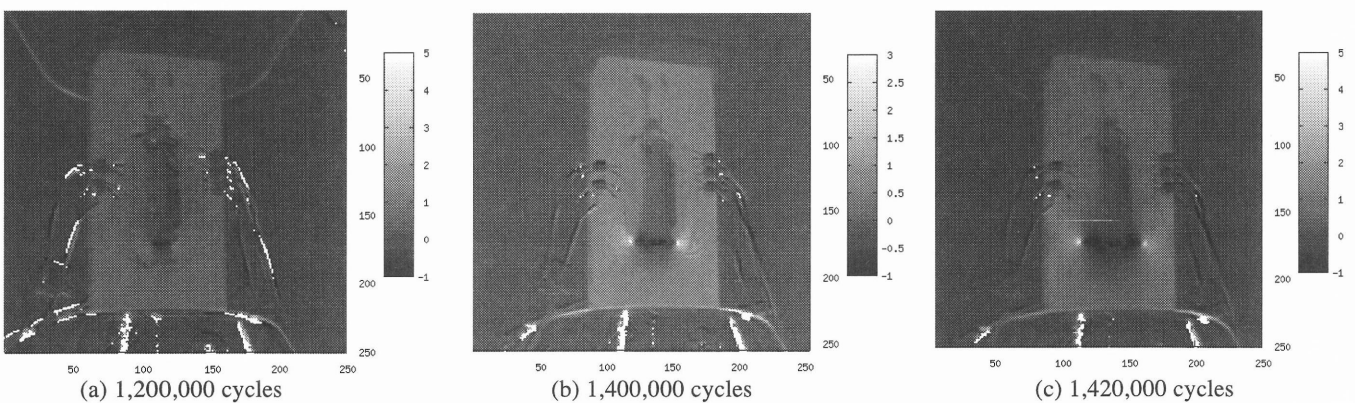


図-2 自己相関ロックインサーモグラフィによる疲労き裂モニタリング

3.2 望遠レンズを用いた測定

自己相関ロックインサーモグラフィ法が外部からの参照信号を必要としない特長を利用し、望遠レンズを装着して遠隔からの測定を行った。望遠レンズの焦点距離は250mm、試験片から赤外線サーモグラフィまでの距離は8.9mであった。結果を図-3に示す。望遠レンズの赤外光学系による赤外線の減衰により、ノイズが若干大きくなったが、それでもき裂を十分検出することができた。（図3の試験片では、疲労き裂がリブの上側に発生・進展している。）

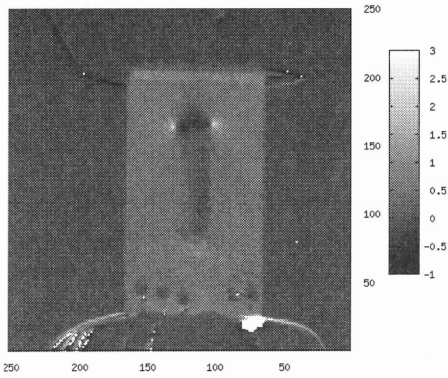


図-3 望遠レンズを用いた遠隔測定

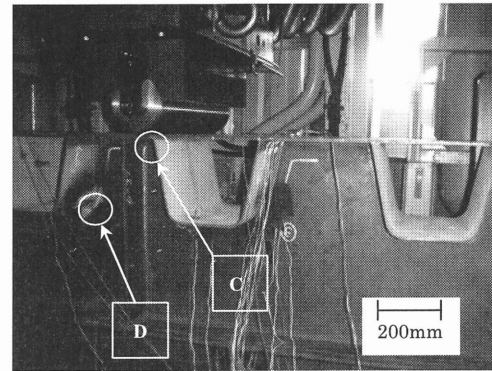


図-4 鋼構造試験体

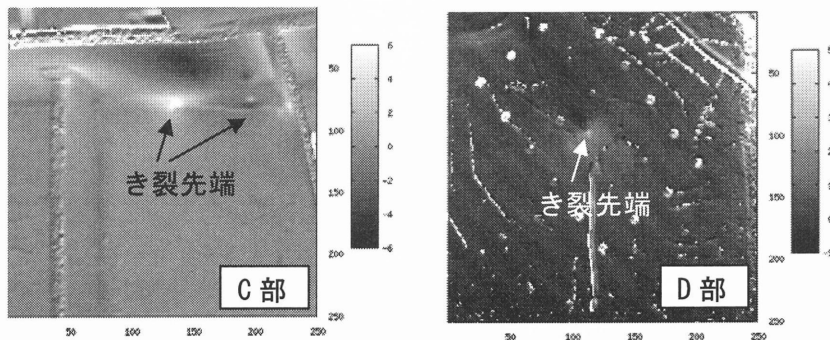


図-5 鋼構造試験体の疲労き裂検出結果

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⁽²⁾。試験体の写真を図-4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。図-4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図-5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することができ、本手法の有用性が確認できた。

5. デッキ貫通疲労き裂の検出⁽³⁾

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。

5.1 試験体および試験装置

試験装置の概観を図-6に、鋼床版試験体を図-7に、それぞれ示す。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。



図-6 試験装置の概観

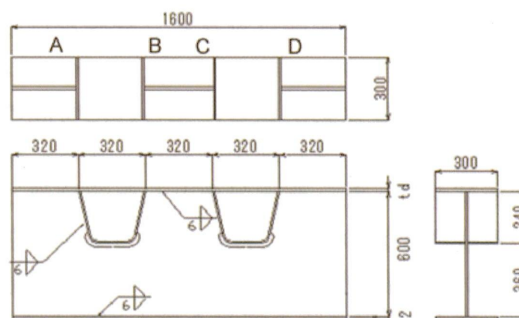


図-7 試験体の概要

5.2 試験結果

図-7に示したA部のデッキプレートとトラフリップ間の溶接部に対して赤外線計測を行い、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図-8に示す。参照信号は、図-8に矢印で示した溶接部の中心付近にとった。繰返し载荷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、载荷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、トラフリップ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。载荷回数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表-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。

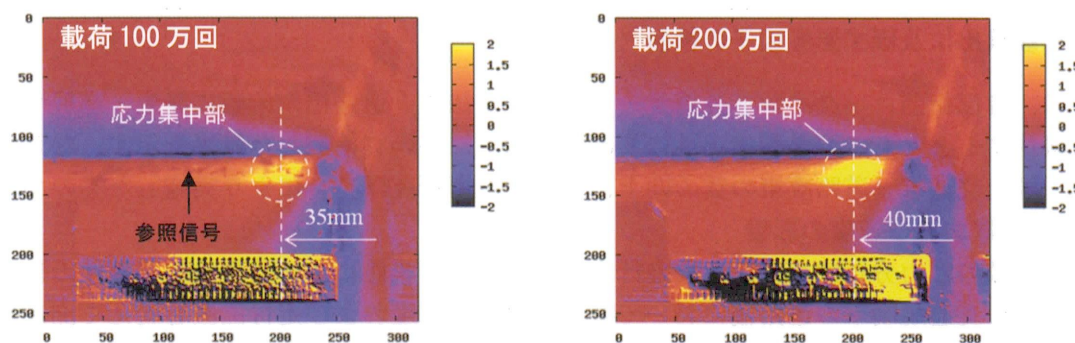


図-8 自己相関ロックイン処理による相対応力分布画像

表 1 赤外線計測と超音波探傷結果の比較

载荷回数	横リブ交差部から応力集中部までの距離 (赤外線計測結果)	横リブ交差部からき裂先端までの距離 (超音波探傷結果)
50万回	横リブと重なっているため判別不能	17mm
100万回	35mm	34mm
200万回	40mm	40mm

6. 実橋梁における疲労き裂検出結果⁽²⁾

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⁽⁴⁾。阪神高速道路神戸線の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。測定箇所の一例を図-9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2箇所の測定結果を図-10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。



図-9 測定対象（鋼床版箱桁橋）

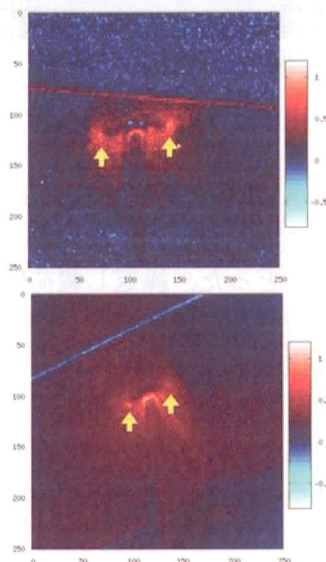


図-10 実構造物のき裂検出結果

7. 疲労き裂検出に及ぼす影響因子の検討⁽⁴⁾

ここでは、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法を、道路橋鋼床版に発生・進展する疲労き裂検出に適用するとともに、き裂検出性に及ぼす諸因子について検討した結果を示す。なお、本報告の一部は、国土交通省「道路政策の質の向上に資する技術研究開発」により実施したものである。

7.1 走行車両位置および速度の影響

疲労き裂先端の応力分布は、床版上を走行する車両の走行状態による輪荷重載荷条件の影響を受ける。本実験では、交通規制下の道路橋において荷重車の走行速度および走行位置を変えて測定を行い、それぞれの因子が欠陥検出性に及ぼす影響について検討を行った。荷重車は、前輪1軸、後輪2軸（ダブルタイヤ）の総重量20tのダンプカーであった。測定対象は、図-11に示すデッキプレート・Uリブ間のビード貫通き裂とした。き裂直上の路面に、図-12のようにき裂位置をスケールおよび養生テープでマークし、マークに対するタイヤの走行位置をビデオカメラにより測定した。走行位置を示す値としては、図-13に示すように、き裂位置から後輪外側タイヤまでの距離を用いた。

様々な走行条件での測定結果の中から、表-2に示す走行条件によりき裂右先端を測定したデータを示す。き裂右端付近の拡大写真を図-14に示す。健全な溶接部に点Bを定め、自己相関ロックイン処理では、点Bにおける赤外線強度変動を参照信号として用いた。溶接部のビード貫通き裂は、図において左から右に進展しており、目視により確認できた裂先端位置は図中にき裂右端と示した所であった。自己相関処理結果および赤外線強度変動波形を図-15に示す。赤外線強度変動波形に現れた3つ

のピークは、荷重車の前後輪の荷重によるものである。図-15(a)および(b)の自己相関処理画像においては、き裂先端の応力集中部が同程度に鮮明に現れている。車両の走行速度により、輪荷重による赤外線強度変動周期は変化するが、自己相関処理による相対応力分布は変化せず、き裂検出性には影響しないことがわかる。これに対して、図-15(c)では、き裂先端の応力集中部が確認しにくくなっており、走行車両がき裂から離れた位置を通るとき、き裂の検出性が低下することが示された。



図-11 測定対象



図-12 走行位置の測定

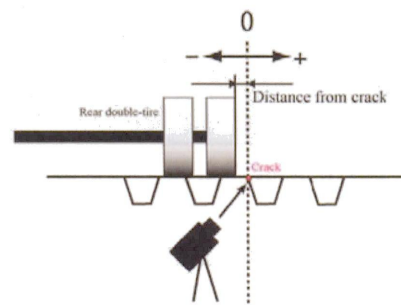


図-13 走行位置の表示方法

表-2 荷重車走行条件

	車速 (km/h)	走行位置 (cm)
No.1	60	+1
No.2	20	+1
No.3	60	+66

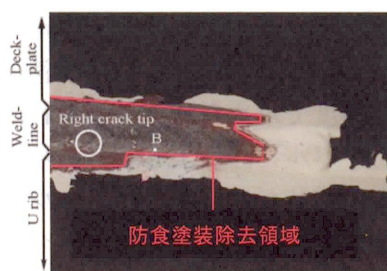
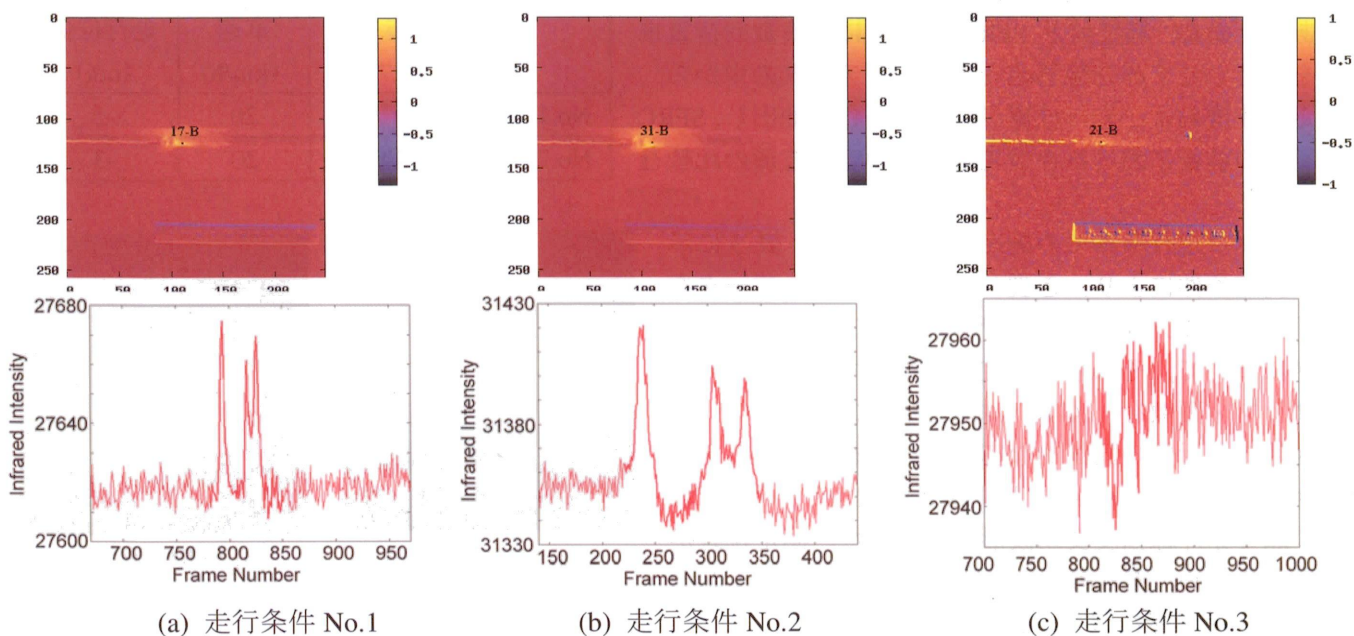


図-14 き裂右端



(a) 走行条件 No.1

(b) 走行条件 No.2

(c) 走行条件 No.3

図-15 自己相関ロックイン測定結果および赤外線強度変動波形

7.2 防食塗装膜の影響

防食塗装が施された供用中の道路橋鋼床版の、デッキプレート・Uリブ間ビード貫通き裂の検出を行った。測定対象を図-16に示す。塗膜割れの無い部分に点Aを定め、点Aにおける赤外線強度変動を自己相関処理の参照信号とした。自己相関処理結果および赤外線強度変動波形を図-17に示す。自

己相関処理画像において、塗膜下のき裂先端付近（塗膜割れの先端位置と一致）の応力集中部が鮮明に現れており、測定対象領域に防食塗装が施されている場合にもき裂の検出が可能であることがわかる。



図-16 防食塗装膜下のき裂検出

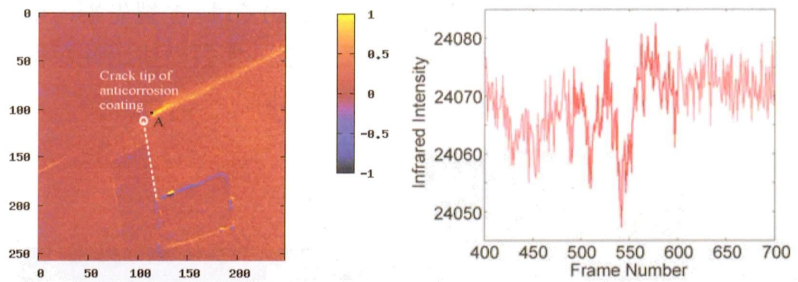


図-17 自己相関ロックイン測定結果および赤外線強度変動

8. 赤外線強度変動波形に基づく作用応力の評価

8.1 SFRC舗装による応力低減効果の検討⁽⁵⁾

前章において示した、供用中の道路橋鋼床版での疲労き裂検出実験において、本計測に用いた高感度な赤外線サーモグラフィによれば、大型車の通過により比較的大きな荷重が鋼床版になされた際には、自己相関ロックイン処理による S/N 改善前の赤外線強度変動データにおいても、赤外線強度変動値や波形が十分な精度で求められることがわかった。これにより、き裂進展駆動力に影響するき裂先端近傍の作用応力レベルを評価することが可能となった。ここでは、疲労き裂を有する道路橋鋼床版において、床版上の舗装が通常のアスファルト舗装から SFRC 舗装に張替えがなされた前後で、疲労き裂先端近傍の応力レベルを赤外線サーモグラフィにより実測し、き裂先端付近の作用応力が SFRC 舗装によりどれ程軽減されたかを検討した。

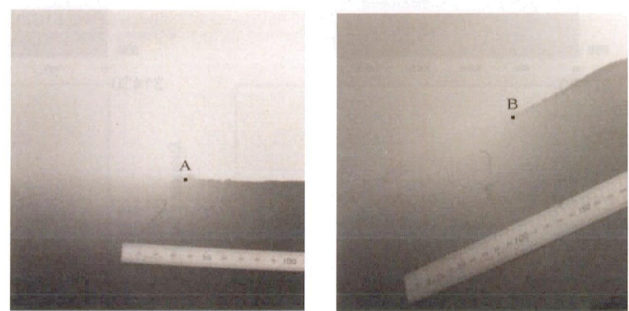
測定対象および測定方法は、前章に示したとおりである。SFRC 舗装前と SFRC 舗装後に、複数回荷重車を走行させて赤外線測定を実施したデータの中から、走行速度および走行位置が同等のものを抽出し、SFRC 舗装の前後におけるき裂先端近傍の応力波形の比較を行った。

様々な走行条件での測定結果の中から、表-3 に示す測定条件により、き裂左先端を測定したデータを示す。SFRC 舗装の前後で得られた二つの測定データについて、それらの測定視野を示す赤外線サーモグラフィ画像を、図-18(a)および(b)にそれぞれ示す。き裂先端近傍の局所的な応力レベルを比較するため、き裂先端付近に点 A および点 B を設定し、それぞれの点で赤外線強度変動波形を取得した。測定視野が異なるため、赤外線画像の特徴をもとに、点 A および点 B を可能な限り一致させた。

得られた赤外線強度変動波形を図-19 に示す。さらに、それぞれの赤外線強度変動波形を参照信号として自己相関ロックイン処理を行った結果を図-20 に示す。ただし、図-19 においては、点 A および点 B で得られた赤外線強度変動波形を、ある基準値からの差分値に変換し、ロックイン処理を行ったデータ範囲について両者の比較を行った。基準値としては、対象データ範囲の直前 100 フレーム分の赤外線強度値の平均値としている。図に示した赤外線強度変動波形および自己相関ロックイン処理結果を、SFRC 舗装の前後で比較すると、荷重車通過時の変動振幅が SFRC 舗装の前後で大きく異なり、

表-3 測定条件

	舗装 タイプ	車速 (km/h)	走行位置 (cm)
No.1	アスファルト	20	-5
No.2	SFRC 舗装	20	-3



(a) SFRC 舗装前 (b) SFRC 舗装後

図-18 測定視野を示す赤外線強度分布画像

自己相関ロックイン処理結果が示すき裂先端の相対応力分布も、通常舗装の場合に比べて小さくなっていることがわかる。さらに、図-19の中に示された、荷重車の前輪および後輪通過時の赤外線強度変動のピーク値の比較結果を表-4に示す。表より、SFRC舗装の効果により、鋼床版の疲労き裂先端近傍の作用応力レベルが、通常のアスファルト舗装の場合と比較しておよそ40%に抑えられていることがわかる。SFRC舗装により、き裂進展駆動力に影響するき裂先端近傍の局部応力低減効果が示された。

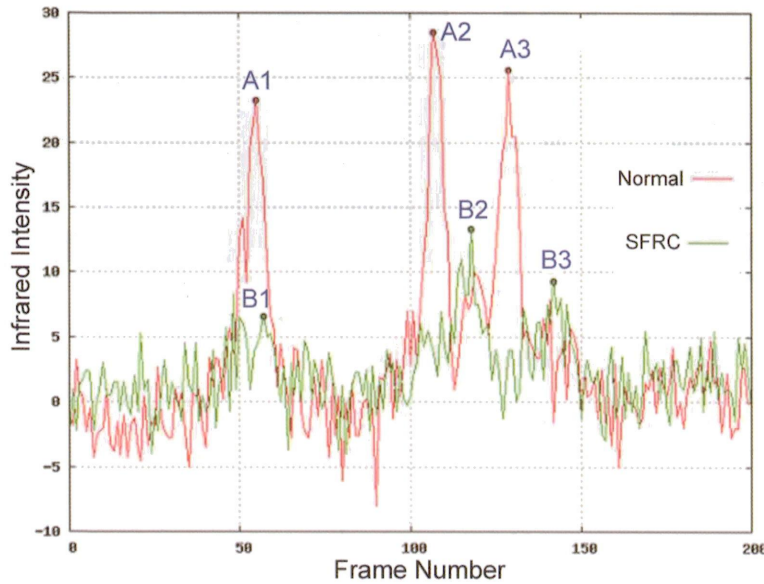


図-19 SFRC舗装の前後での赤外線強度（応力）波形の比較

表-4 応力低減効果

	アスファルト		SFRC舗装	
前輪	A1	23.4	B1	6.7
後輪	A2	28.7	B2	13.5
後輪	A3	25.7	B3	9.5

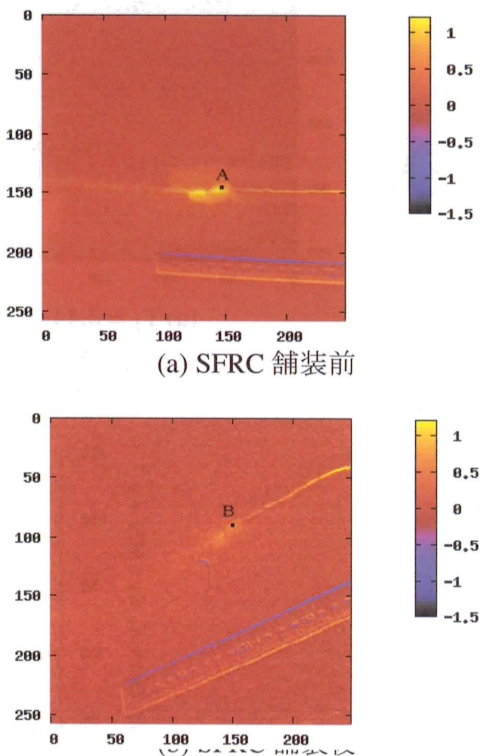


図-20 自己相関ロックイン処理による相対応力分布画像

8.2 き裂先端近傍の応力分布に基づく応力拡大係数評価⁽⁶⁾

車両通過時の輪荷重によって発生する、疲労き裂周辺での応力変動の分布を、赤外線サーモグラフィにより計測できるため、これに基づき破壊力学パラメータを算出できる。そこで、赤外線サーモグラフィにより計測されたき裂周辺の応力分布から応力拡大係数 K_I 、 K_{II} を算出し、その妥当性の検討を行った。

計測対象は、鋼床版のデッキプレートとトラフリップ間の溶接部に発生した疲労き裂とした。床版上を車両が走行したときの、き裂先端付近の応力変動に伴う赤外線強度変動を、赤外線カメラによりフレームレート113Hzで撮影した。赤外線強度と応力の較正関係は、黒体炉による温度較正および軟鋼を仮定した熱弾性係数を基に求めた。また本実験では、車両通過時の橋梁の振動による画像内の揺れを、画像処理により補正した後応力分布評価を行った。

床版上を車両が通過した時のある時刻 $T_1=0.44(\text{sec})$ 、および $T_2=0.65(\text{sec})$ におけるき裂先端周辺の主応力和変動分布画像を図-21(a)および(b)に示す。デッキプレートとトラフリップ間の溶接ビート上にき裂先端での応力集中が確認できるとともに、輪荷重の移動にともない応力分布が変化していることがわかる。

つぎに、得られた主応力和分布に対して応力外挿法を適用して、応力拡大係数 ΔK_I 、 ΔK_{II} を求めた。車両通過中の連続応力分布画像をもとに、応力拡大係数の変動 ΔK_I 、 ΔK_{II} の時系列変化を求めた結果を図-22に示す。測定結果より、 ΔK_I の変動に対して ΔK_{II} の変動は大きく、本実験で対象としたき裂周辺での作用応力は、モードIIが支配的であることが分かった。

このように、き裂先端近傍の応力分布より、 ΔK_I 、 ΔK_{II} の変動を捉えることができたため、き裂進展速度に関するデータが得られれば、実構造物における実働荷重条件下でのき裂先端近傍の応力分布の実測に基づき、よりの確かな疲労き裂の進展予測が可能であると考えられる。

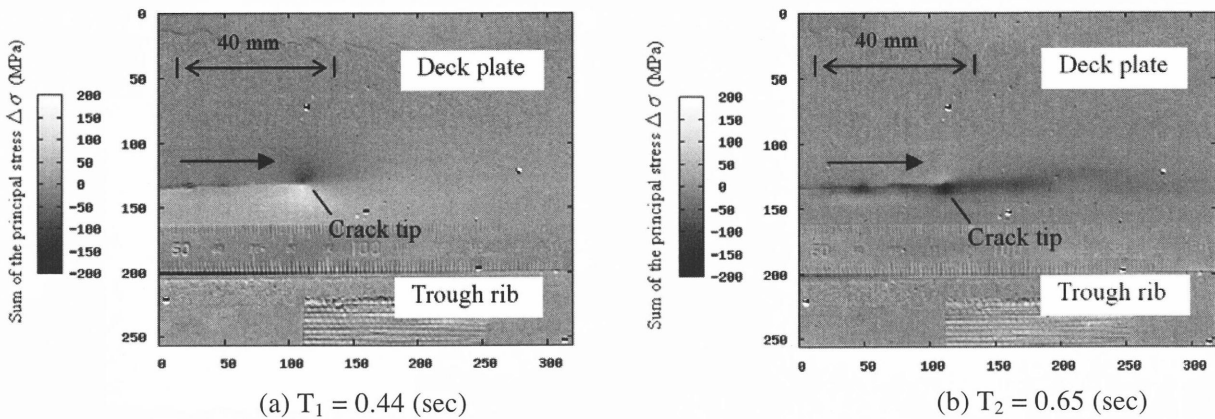


図-21 き裂先端周辺の主応力和変動分布画像

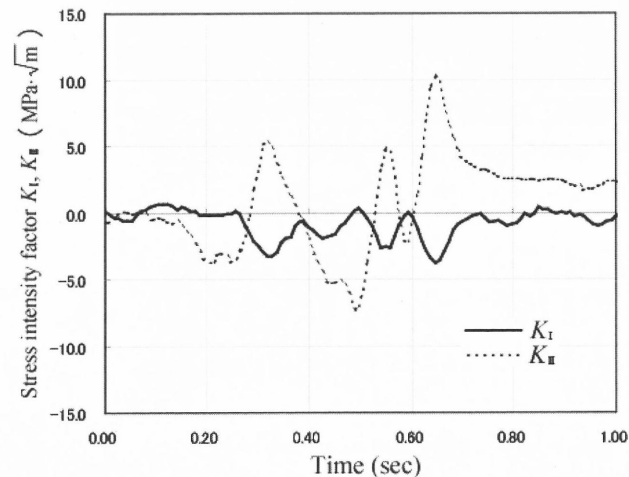


図-22 応力拡大係数の時系列変化

文献

- 1) 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，pp. 1860-1867，2006.
- 2) 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，pp. 1171-1172，2006.
- 3) 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，発表予定.
- 4) 阪上隆英ほか 5 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測定～疲労き裂検出に及ぼす影響因子の検討～，土木学会平成 20 年度全国大会講演概要集，2008，発表予定.
- 5) 阪上隆英ほか 6 名：鋼床版の疲労き裂周辺の赤外線応力測定結果に基づく SFRC 舗装効果の検討，土木学会平成 20 年度全国大会講演概要集，2008，発表予定.
- 6) 和泉遊以，阪上隆英，久保司郎：赤外線サーモグラフィによる道路鋼床版の疲労き裂進展評価，日本材料学会第 57 期学術講演会講演論文集，pp. 77-78，2008.