Sonic-IR 法を用いたクレーン走行桁亀裂診断技術の開発

今西 大輔^{*1}, 西名 慶晃^{*2}, 栗原 康行^{*3}

Development of crack inspection method on crane runway girder using Sonic-IR

Daisuke IMANISHI^{*1}, Yoshiaki NISHINA^{*2} and Yasuyuki KURIHARA^{*3}^{*1, *2} JFE Steel Corp. Mechanical Engineering Research Dept.

1 Koukan-cho, Fukuyama-shi, Hiroshima 721-8510, Japan

^{*3} JFE Steel Corp. Civil Engineering Research Dept.

1-1 Minamiwatarida-cho, Kawasaki-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 210-0855, Japan

Received: 26 March 2017; Accepted: 14 May 2017

Abstract

In recent study, active thermography has reached a high status as an easy and speedy defects inspection method in a NDT field. This paper newly proposes a remote and non-contact NDT method using a sonic-IR for detecting and evaluating of fatigue cracks at runway girder of the overhead crane in the steel making plant. In this method, fatigue cracks are detected as localized high temperature areas caused by friction and collision at crack surfaces with an infrared camera, applying a high-amplitude ultrasonic vibration. In this paper, sonic-IR method is applied to remote and high-efficient crack inspection of the runway girder in the overhead traveling crane. Target crack located in high place can be detected using this method without setting up scaffolding for inspection. And the threshold of vibration amplitude to generate the sufficient heat for crack detection is clarified. Therefore the system to prevent missing the crack by unsuccessful vibration transmission from vibrator is developed applying monitoring the vibration. Time and cost saving inspection method in runway girder of the overhead traveling crane is carried out using this NDT technique.

Key words : Infrared, Thermography, Sonic-IR, Vibro-thermography, Crack, NDI

1. 緒 言

製鉄所内の各製造ラインには、溶鋼搬送、鉄鋼スラブ搬送、製品コイル搬送等のため、多数の大型天井クレーンが稼働している。図1に一般的な天井クレーンの装置構成を示す。天井クレーンは建屋の両壁に設けられた走行桁（ランウェイガーダー）とクレーンガーダーおよびクラブトロリから構成され、クレーンガーダーが走行桁上を走行し、クラブトロリを巻き上げ下げすることで対象物を搬送する。天井クレーンは一旦設置されると長期間使用されることが多く、また走行桁には搬送物重量かつクレーンガーダー自重が繰り返し荷重として作用するので、多くの疲労損傷発生事例が報告されている。（橋内，前田，1996，志村，宇野，1986）

天井クレーンの構成要素の中でも、走行桁の損傷は重大事故につながりやすく、また生産ラインに与える影響も大きい。よって損傷を防止するため、走行桁は計画的にき裂点検，メンテナンスが実施されている。走行桁のき裂検査方法としては、地上およびクレーン上歩廊からの目視検査，足場を組んでの超音波探傷法（UT法），磁粉探傷法（MT法），浸透探傷法（PT法）が挙げられる。しかし，走行桁には長期間の使用によって，粉じんや汚れが付着しており目視でき裂を発見するのは非常に困難である。また，UT法，MT法，PT法は検査のために対象物に機器を直接接触させる必要がある。しかし，一般的に走行桁は高所に設置されており，これらの手法を適用するためには検査足場を設置する必要がある。そのため，検査効率が悪く，検査コストも多大となる。本

No.16-00554 [DOI:10.1299/transjsme.16-00554], J-STAGE Advance Publication date: 26 May, 2017

^{*1} JFE スチール（株）（〒721-8510 広島県福山市鋼管町1）^{*2} 正員，JFE スチール（株）^{*3} JFE スチール（株）（〒210-0855 神奈川県川崎市川崎区南渡田町1-1）

E-mail of corresponding author: d-imanishi@jfe-steel.co.jp

稿では、これらの問題を解決するため、赤外線サーモグラフィを用いた構造物劣化検出手法の1つである Sonic-IR 法（超音波励起サーモグラフィ法、あるいは Vibro-Thermography 法とも呼ばれる）を、製鉄所の天井クレーン走行桁に発生する疲労き裂の遠隔高効率検査へ適用検討した結果を述べる。

Fig.1 Schematic illustration of overhead traveling crane.

2. Sonic-IR 法の原理

赤外線サーモグラフィは、温度検出素子の分解能向上、また計算機の性能向上により現在様々な分野で利用されている。特に、非接触、遠隔で測定が可能であり、広範囲を面測定できることから、近年、非破壊検査の分野で高効率検査手法として注目されている。その中でも Sonic-IR 法は、赤外線サーモグラフィと超音波加振機を組み合わせたき裂検出手法（Henneke et al., 1979, Favro et al., 2000）である。測定原理のモデル図を図2に示す。き裂を含む構造物を大振幅超音波により連続加振するとき、圧縮応力を受けたき裂破面の摩擦・打撃の作用により、き裂部で局所的な温度上昇が生じる。これを赤外線サーモグラフィで計測し、高温部としてき裂を検出する。本手法はき裂面の摩擦・打撃による温度上昇を利用しているので、他のき裂検査手法では検出が難しいとされている閉き裂の検出に適している。疲労によるき裂の多くは、目視では検出が難しい閉き裂であるので、本手法は疲労き裂検出に有効である。

Fig. 2 Schematic illustration of principle of Sonic-IR method.

3. ラボ検討結果

3・1 実験装置構成について

本検討では振動発生装置として超音波ウェルダ（株カイジョー社製 C-6281A 型）を用いた。超音波ウェルダは振動子で発生した振動を SUS304 製超音波ホーンで増幅し、超音波ホーン先端を対象物に接触させることにより、対象物に振動を入射する。超音波ホーン先端部位での振動周波数は 19.5 kHz、面外方向振幅は 20 μm である。そして、振動入射時のき裂周辺の温度分布を赤外線サーモグラフィ（Cedip 社製 JadeIII）を用いて計測した。本試験で用いた赤外線サーモグラフィ装置は、InSb を検出素子としており、温度分解能は 0.02 K である。また、本試験では、き裂検出精度向上の為、ロックイン処理（阪上他, 2004）を行っている。この手法は、測定された時系列温度データに対して、温度変動に関する参照信号との相関処理を取ることで、S/N 比を向上させる信号処理手法である。今回、参照信号としては、超音波加振機と検査対象との接触部における時系列温度変動を用いた。この手法を用いることにより温度分解能を 0.01 K 以下にまで改善することができ、微小発熱の検出に有効である。

3・2 最小き裂検出深さ性能評価について

図 3 に示すように、140 mm×235 mm×t=50 mm の平板の端部に、深さが 2 mm から 25 mm の疲労き裂を導入したサンプルを用いて、本手法の最小き裂検出深さを求めた。平板の材質として一般的にクレーン走行桁に使用されている SS400 を用いた。また、平板中の疲労き裂は繰り返し曲げ疲労試験機を用いて指定のき裂サイズになるまで疲労曲げを行い導入した。サンプル中のき裂深さは超音波法を用いて同定している。この平板サンプルをバイスで定盤に固定し、平板サンプル端部(図 3 中 A 部)に対して超音波ホーンの振動入射面が垂直方向になるように押し当て超音波振動を入射した。図 4 に示す超音波ホーンは SUS304 製でサイズは 127 mm×72 mm×t=24 mm である。また、入射振動の周波数は 19.5kHz、ホーン先端面の振動振幅は面外方向に 20 μm である。さらに、温度測定部には赤外線反射によるノイズを防ぐためつや消し塗料を塗布した。

き裂直上の温度測定結果を図 5 に示す。図中のプロットは同一のき裂長の平板サンプルを 5 回測定した平均であり、き裂長が大きくなるほど温度上昇量は増加し、またバラつきが大きくなった。き裂の深さが深くなるほど、き裂破面同士の接触面積が大きくなるため、発生する摩擦エネルギーが大きくなり、その結果として発熱量が増加したと考えられる。また、閉き裂としてき裂破面が接触している箇所と、開き裂としてき裂破面が接触していない個所が逐次変化することで、き裂破面の摩擦状態が変化するため、発熱量のばらつきが大きくなったと考えられる。今回計測した最小サイズである深さ 2 mm（き裂長 10 mm）のき裂の赤外線画像を図 6 に示す。き裂サイズが深さ 2 mm の場合、平均温度上昇量は 0.05 K 程度であり、温度分解能は 0.01 K 以下であるので十分検出が可能である。今回の試験において、走行桁中の最小検出目標をき裂深さ 24 mm と設定している。本検出目標はき裂進展解析により決定し、当該サイズ以下のき裂は仮に定期検査で検出できなかった場合でも、次回の定期検査時までの期間中、き裂進展によるクレーン走行桁の破壊リスクが非常に低いき裂サイズである。本試験より、Sonic-IR 法を用いて目標サイズである深さ 24mm のき裂の検出は達成可能であることがわかる。

Fig. 3 Plate specimen shape and position of fatigue crack.

Fig. 4 Ultrasonic horn. (t=24mm)

Fig. 5 Relationship between crack depth and temperature rise.

Fig. 6 Infrared image of the crack.

3・3 き裂検出性の確認

次に、走行桁を模擬した SS400 製試験体を作成し基礎検討を行った。試験体形状を図 7 に示す。超音波振動は、一般的に距離の影響を受け減衰が起こる。また、溶接部においては母材と溶接部金属の音響インピーダンスの差により溶接部境界で反射が発生し減衰することが懸念される。よって、本技術の実用化のためには、走行桁中での減衰の影響を調べる必要がある。そのため、試験体は実際の走行桁と同様に溶接構造を用いて製作し、下フランジ部に疲労き裂を模擬した疑似閉き裂（深さ 24 mm，長さ 30 mm）を導入した。まず下フランジ部に 0.3 mm のスリットを電解加工で導入し、スリット部にスリットと同サイズの $t=0.3$ mm 銅片を挿入し疑似閉き裂とした。本試験では上フランジ部の端部より 100 mm の部分（図 7 中 B 部）に対して、振動入射面が垂直方向になるよう超音波ホーンを押し当て超音波振動を入射し、赤外線サーモグラフィを用いて疑似閉き裂部近傍での温度画像を計測した。赤外線カメラには、焦点距離 50 mm のノーマルレンズ、200 mm の望遠レンズの 2 種類を使用した。また、走行桁模擬試験体は定盤上にバイスで固定した。なお、走行桁模擬試験体には実際の走行桁に使用されている防錆塗料と同じものを塗布した。

測定距離 10 m および 15 m での赤外線画像を図 8 に示す。き裂は局所的に温度上昇し、局所高温部として十分検出可能である。この結果から、上フランジ部から超音波振動を入射し、ウェブ部の溶接線を介して下フランジ部に存在するき裂に振動を伝達させることは十分可能である。したがって、実際のクレーン走行桁においても歩廊からアクセスが容易な上フランジ部に振動発生装置を設置し、振動を伝搬させることにより下フランジ部、ウェブ部のき裂を検出することは可能であるといえる。

次に、赤外線サーモグラフィの計測距離を変えた場合のき裂検出可否を検討した。赤外線サーモグラフィと対象物の距離を大きくすると、1 ピクセルあたりの単位大きさ（画素分解能）は拡張されていく。可検出き裂サイズにはこの画素分解能が大きく関わっており、理論的には計測距離が大きくなるほどき裂検出能は悪くなる。表 1 に各計測距離でのき裂検出可否を示す。表より望遠レンズを装着すれば目標サイズのき裂は 15 m の距離から十分検出可能であることがわかる。製鉄所に設置されている天井クレーン走行桁の多くが地上からの高さが 10 m 以下であるため、地上に赤外線サーモグラフィを設置し、足場を設置することなく遠隔から走行桁中のき裂を検出可能である。

Fig. 7 Runway girder specimen shape and position of fatigue crack.

Fig. 8 Infrared image of crack using telephoto lens.

Table 1 Result of remote crack detection (Crack depth 24 mm)

	Measured distance				
	1 m	5 m	10 m	15 m	20 m
Normal lens (Focal distance = 50mm)	○	○	×	×	×
Telephoto lens (Focal distance = 200mm)	○	○	○	○	×

○ Detectable × Non-Detectable

3・4 振動計測による振動伝達確認

前記走行桁模擬試験体を用いて、加振時の模擬き裂近傍での面外方向振動をレーザー式振動計(キーエンス社製 LKG-15)で計測した。そして、振動中の加振周波数(19.5 kHz)の周波数成分を取り出し、その振動振幅と模擬き裂部での温度上昇量の関係を調べた。なお、温度上昇量は距離 10 m からサーモグラフィ装置で測定した値を用いた。結果を図 9 に示す。図中の○は加振によりき裂部と健全部で十分な温度差がついており高温部位としてき裂が赤外線画像上視認できた場合である。図をみるとき裂検出可能時の温度上昇量のばらつきが大きい。3.2 節で述べたように模擬き裂中の閉き裂としてき裂破面が接触している箇所と、開き裂としてき裂破面が接触していない箇所が存在し逐次変化することで、き裂破面の摩擦状態が変化するため、発熱量のばらつきが大きくなったと考えられる。また、振動振幅のバラつきは試験体と超音波ホーンとの接触面が完全に平滑、清浄ではなく接触状態が逐次変化することに起因すると推定される。ただ、き裂近傍での振動振幅が $0.02 \mu\text{m}$ を超えた場合には、すべての場合においてき裂が検出できており、この振動レベルを超える振動がき裂まで伝達した場合は、十分な温度上昇が発生し局所高温部としてき裂が検出できることがわかる。一方、図中の×はき裂が視認できなかった場合である。この場合でも微量の温度上昇は確認されるが、き裂部と健全部の温度差が非常に微小であるため、熱拡散の影響で局所高温部が形成されずき裂を視認することが出来ない。

Fig. 9 Relationship between vibration amplitude and temperature rise.

3・5 発熱振動同時計測による亀裂検出システム

図 10 に従来及び、本研究で開発した亀裂判定フローを示す。Sonic-IR 法を走行桁のき裂検出に適用するにあたり、超音波ホーンと振動入射面の接触、あるいは振動入射面の形状、表面状態が不良の場合は振動を効率的に入射することが出来ない。この場合、当然き裂は発熱せず、局所温度上昇部としてき裂を検出することは出来ない。したがって図 10(a)のような従来の赤外線画像のみを使用した検出フローでは、き裂発熱が確認できない場合、き裂が存在しないのか、あるいは前記のような加振不良なのかを判別することが出来ない。そのため、仮に検査箇所にき裂が存在した場合、き裂見逃しにつながり重大なリスク要因となってしまう。一方、本報で提案する図 10(b)は赤外線画像と振動値を両方用いてき裂判定を行う検出フローである。本手法を用いれば、まず、加振状態を確認することにより加振不良によるき裂部の非発熱を除外することが出来る。また、振動伝達が不十分な場合は加振面の清掃、加振位置の変更等を行った上での再加振を実施することにより振動伝達を適正化することが可能である。よって、き裂への振動不良による検出漏れを防止し、検査精度を高めることが出来る。

Fig. 10 Crack inspection flow using Sonic-IR.

4. オフライン実走行桁き裂検出試験

次に実際の天井クレーン走行桁を使用し、き裂検出試験を実施した。本走行桁は製鉄工場において30年以上使用され、定期検査において三角リブ溶接端部（図13中A部）にき裂が検出されたため取り替えられたものである。き裂検出試験の模式図を図11に示す。試験体は直接荷重を支える走行桁と、水平力を支えるバックガーターがラチス材で溶接接合されている。走行桁部の長さは16m、高さは約2mであり、試験時はH型鋼上に静地した。また、走行桁には全体にわたり防錆塗装がされている。走行桁フランジ上端部に電磁石を用いて超音波加振機を固定し超音波加振を行い、加振中の下フランジ部下面における振動振幅をレーザー振動計で計測した。下フランジ部は加振点である上フランジ部から最も遠く、振動伝達経路に溶接部を含むため母材と溶接金属間で反射が発生し振動が減衰しやすい部位である。なお、超音波加振機、レーザー変位計は前述のラボ試験で使ったものと同じものを使用した。図12に加振点直下からの距離と振動振幅の推移を示す。下フランジ端部においても閾値 $0.02\ \mu\text{m}$ 以上の振動振幅が計測されており走行桁全体にき裂発熱に十分な振動が伝達していることがわかる。これは、設置場所である上フランジ部が平坦な部材であり、接触部である超音波ホーンとの接触が良好であり振動が十分伝達しているためである。また同時に10mの遠隔から赤外線サーモグラフィによる温度分布測定を実施した。図13にSonic-IR法を適用した場合のき裂検出試験結果を示す。き裂部に局所発熱が発生しており、十分き裂を視認することが出来る。

Fig. 11 Schematic illustration of crack inspection test with actual runway girder.

Fig. 12 Vibration amplitude in lower flange.

Fig. 13 Result of crack inspection.

5. 結 言

本稿では天井クレーン走行桁の高効率遠隔き裂検査に対して、赤外線サーモグラフィを利用した手法である Sonic-IR 法の適用を検討した。その結果、以下のことがわかった。

- (1) Sonic-IR 法により、実際のクレーン走行桁検査サイクルを考慮した上での目標サイズの貫通き裂は十分検出可能である。
- (2) 望遠レンズを用いれば地上に赤外線サーモグラフィ装置を設置し、超音波加振機のみを移動させることで走行桁中のき裂を検査することが出来るので高効率な検査が可能である。
- (3) 振動計測と温度分布計測を同時に行うことにより、振動伝達不良によるき裂検出漏れのリスクを大幅に減らすことが可能である。

文 献

- Favro, L. D., Han, X., Ouyang, Z., Sun, G., Sui, H. and Thomas, R. L., Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse, *Review of Scientific Instruments*, Vol.71 (2000), pp.2418-2421.
- Favro, L. D., Thomas, R. L., Han, X., Ouyang, Z., Newaz, G. and Gentile, D., Sonic infrared imaging of fatigue cracks, *International Journal of Fatigue*, Vol.23 (2001), pp.5471-5476.
- Henneke, E. G. II, Reifsnider, K. L. and Stinchcomb, W. W., Thermography – An NDI method for damage detection, *The Journal of Minerals, Metals & Materials Society*, Vol.31 (1979), pp.11-15.
- 橋内義男, 前田豊, 天井クレーンの経年損傷による倒壊防止に関する研究-クレーンの経年損傷状況, 産業安全研究所特別研究報告 NIIS-SRR, No.15 (1996), pp.7-15.
- Milan, A., Han, X., Islam, S. and Newaz, G., Fatigue damage detection in graphite/epoxy composites using sonic infrared imaging technique, *Composites Science and Technology*, Vol.64 (2004), pp.657-666.
- Renshaw, J., Chen, J. C., Holland, S. D. and Thompson, R. B., The sources of heat generation in vibrothermography, *NDT&E International*, Vol.44 (2011), pp.736-739.
- 阪上隆英, 西村隆, 久保司郎, 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法の開発とき裂モニタリングへの適用, 評価・診断に関するシンポジウム講演論文集, Vol.2004, No.3(2004), pp.123-127.
- 志村保美, 宇野のぶ芳, 新日本製鉄におけるクレーンランウェイガーダーの疲労破損対策技術, *カラム*, No.100 (1986), pp.89-96.

References

- Favro, L. D., Han, X., Ouyang, Z., Sun, G., Sui, H. and Thomas, R. L., Infrared imaging of defects heated by a sonic pulse, *Review of Scientific Instruments*, Vol.71 (2000), pp.2418-2421.
- Favro, L. D., Thomas, R. L., Han, X., Ouyang, Z., Newaz, G. and Gentile, D., Sonic infrared imaging of fatigue cracks, *International Journal of Fatigue*, Vol.23 (2001), pp.5471-5476.
- Henneke, E. G. II, Reifsnider, K. L. and Stinchcomb, W. W., Thermography – An NDI method for damage detection, *The Journal of Minerals, Metals & Materials Society*, Vol.31 (1979), pp.11-15.
- Kitsunai, Y. and Maeda, Y., Survey of degradation for overhead travelling cranes, *NIIS-SRR*, No.15 (1996), pp.7-15 (in Japanese).
- Milan, A., Han, X., Islam, S. and Newaz, G., Fatigue damage detection in graphite/epoxy composites using sonic infrared imaging technique, *Composites Science and Technology*, Vol.64 (2004), pp.657-666.
- Renshaw, J., Chen, J. C., Holland, S. D. and Thompson, R. B., The sources of heat generation in vibrothermography, *NDT&E International*, Vol.44 (2011), pp.736-739.
- Sakagami, T., Nishimura, T. and Kubo, S., Development of a self-reference lock-in thermography and its application to crack monitoring, *Symposium on Evaluation and Diagnosis*, Vol.2004, No.3 (2004), pp.123-127 (in Japanese).
- Shimura, Y. and Uno, N., Fatigue fracture prevention measures of crane run-way girder in The Japan steel works, LTD., *Column*, No.100 (1986), pp.89-96 (in Japanese).