

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2017

課題番号：16K18141

研究課題名(和文)誘導加熱を利用した革新的亀裂検査法の開発

研究課題名(英文)Development of innovative crack inspection method using induction heating

研究代表者

出水 享 (DEMIZU, Akira)

長崎大学・工学研究科・技術職員

研究者番号：00533308

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：鋼橋で用いられている亀裂検査法として磁粉探傷試験や浸透探傷試験がある。これらの検査法は、検査時間が長い、検査範囲が狭い、塗装を除去しないと検査できないなどの問題がある。そこで、本研究では、既存の検査技術の問題を解決するため塗装を除去することなく短時間かつ広範囲に鋼材の亀裂を検査可能な技術を開発した。開発手法は塗装の上から誘導加熱装置により加熱させて亀裂を開閉させ、加熱前後(亀裂の開閉前後)の画像を計測して、画像解析により亀裂を可視化する手法である。研究成果とし、誘導加熱装置の開発、カメラ装置・計測治具の開発を行うとともに亀裂が入った鋼部材において検出実験を行い亀裂の可視化に成功した。

研究成果の概要(英文)：As crack inspection method used in steel bridges, there are magnetic particle flaw detection test and penetrant inspection test. These inspection methods have problems such as long time, narrow range, inspecting unless paint is removed. Therefore, in this research, in order to solve the problem of the existing inspection technology, we developed technology capable of inspecting cracks of steel materials in a short time and in a wide range without removing paint. The development method opens and closes the crack by heating it from the paint by the induction heating device. Measure images before and after heating (before and after opening and closing cracks), and visualize cracks by image analysis. As a result of research, we developed induction heating device, camera device and measuring jig, and succeeded in visualizing cracks by conducting detection experiments on cracked steel members.

研究分野：維持管理工学

キーワード：鋼部材 亀裂 デジタル画像 非破壊試験 検査 点検 維持管理 鋼橋

### 1. 研究開始当初の背景

近年、鋼橋の疲労亀裂の発生事例が増加している。疲労亀裂は安全性に重大な影響を及ぼす恐れがあるため早期に発見し、適切な処置を行う必要がある。現在、鋼橋で利用されている亀裂検査としては磁粉探傷試験や浸透探傷試験がある。亀裂検査の手順は、橋梁の点検員が近接目視点検を行い、塗膜割れ(写真1)を発見することから始まる。その後、塗装を除去し上述する試験を行い亀裂を確認する流れである。しかし、塗膜割れが発見されたからといって母材に亀裂が必ずあるとはいえないのが現状である。橋梁Aにおいて約100箇所の塗膜割れが発見され全箇所磁粉探傷試験を行った結果、約2割(20箇所)しか亀裂が確認されなかった事例もある。

このように、既存の検査技術では塗装を除去しなければ亀裂を発見できない問題がある。また、試験後に再塗装の必要もあり作業性が悪い。検査時間は1箇所に40分(2人作業)を要する。さらに、亀裂の判読が難しく経験が必要となる。

そのため塗装を除去することなく短時間に簡単に亀裂を検査する技術の開発が必要である。



写真1 塗膜割れ

### 2. 研究の目的

研究代表者は既存の亀裂検査技術の問題を解決すべく、誘導加熱装置により鋼材を加熱してデジタルカメラにより亀裂を検出する手法“誘導加熱探傷法”を開発した。誘導加熱探傷法は、新しい亀裂検査法として鉄鋼新聞(2014.11)に掲載された。2015年11月にFHWA(米国連邦道路局)の本部において、本技術のデモンストレーションを行った。このように誘導加熱探傷法の必要性・有効性が認められている中、実用化のための新しいシステム開発が求められている。

そこで本研究では、実用的な亀裂検出システムを開発するため新しい計測システムならびに誘導加熱装置の開発を行い疲労亀裂が発生した部材において亀裂検出実験を行うことを目的としている。

### 3. 研究の方法

図1に検査概要を示す。検査法は誘導加熱装置(IHヒーター)により塗装の上から鋼材のみを直接加熱して、亀裂を強制的に開口・閉口させる。加熱前後(亀裂の開口・閉口前後)の画像をデジタルカメラで撮影して、撮影画像をデジタル画像相関法により解析することで亀裂の開口・閉口ひずみを算出する手法である。画像計測するため広範囲な検査が可能である。また、亀裂の開口・閉口ひずみを可視化できるため検査に熟練を要さず亀裂の判読が可能である。計測システムは、デジタルカメラ、照明、パソコン、誘導加熱装置で構成される。そのため、簡易なシステムかつ軽量である。

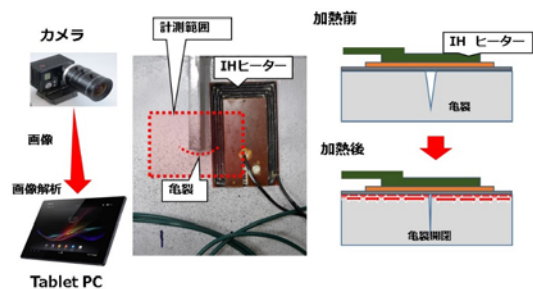


図1 検査概要

デジタル画像相関法は、測定対象物表面の模様ランダム性を基にして、変形前後の測定対象物表面をデジタルカメラなどで撮影したデジタル画像を画像処理することにより、計測範囲にわたって変形の大きさと方向を求めることができる解析手法である。解析原理は、デジタル画像が一般的に256階調で表現された濃淡のある画像であることを利用したものである。

まず、変形前の画像において、任意の点(1画素)を中心とした $N \times N$ 画素の任意領域(サブセット)を指定する(図2(a))。計測対象物に変位を与えると、変形後の画像でのサブセットの位置は変化する(図2(b))。変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの輝度値分布と高い相関性を示すサブセットを数値解析で探索する。このサブセット中心の点の移動より変位方向、変位量を算出する。ひずみ解析は、以上の手法により得られた変位計測結果を利用してひずみ分布を求める。これは、あらかじめ求めたい点を中心として、ある画素数だけ離れた点の変位を基に、変形後の2点間の長さの変化を求め、計測点のひずみとする解析手法である。

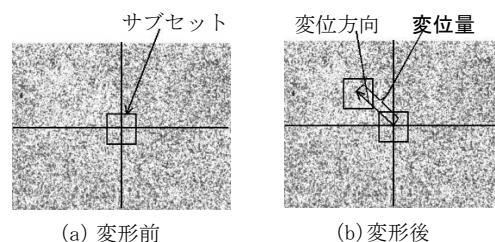


図2 変形前と変形後のデジタル画像

#### 4. 研究成果

##### (1) 計測装置の開発

開発した計測装置を写真2に示す。約100mm×100mm×60mmの範囲に収まる大きさで、重さは約300gである。防水・防塵仕様となっているため実現場の悪環境においても利用可能である。LEDライトを取り付けているため桁下空間など暗い場所においても利用可能である。計測装置の取り付け方法は、非常に簡単で、ネオジウム磁石をとりつけているためワンタッチで設置が可能である。磁力が強力であるため振動などにより計測システムが外れる心配はない。カメラの角度を調整できる仕組みとしているため角度がついた部材の撮影も可能である。

今回用いたカメラは、小型のデジタルカメラ（GOPRO）を用いている。計測装置の撮影対象物までの距離は約100mmである。使用したカメラのワーキングディスタンスが100mmより遠いため、撮影するとぼやけた画像となる。そのため特殊なレンズを取り付けて100mmにおいても鮮明な画像が撮影できるように工夫をした。撮影に関しては無線で撮影可能であるためスマートフォンやタブレットPCを用いる。



(a)前面 (b)背面

写真2 計測装置

##### (2) 誘導加熱装置の開発

開発した誘導加熱装置を写真3に示す。誘導加熱装置は加熱部と制御部で分かれている。加熱部は2つあり同時に100mm×50mmの範囲を加熱できる仕組みとしている。制御部は加熱時間を1秒刻みに設定ができる。また、設定し時間に達すると自動的に加熱が終了する仕組みとしている。



写真3 誘導加熱装置

##### (3) 誘導加熱装置の性能確認

開発した誘導加熱装置の加熱性能を確認するため厚さ12mmの鋼材を加熱して温度上昇と温度分布の確認を行った。比較として加熱実験に一般的に使われるシリコンラバーヒーターを用いた。シリコンラバーヒーターは誘導加熱装置と同じ範囲(100mm×50mm)を加熱できるものを選定した。温度上昇の確認は加熱装置の間にKタイプの熱電対を設置して鋼材表面の温度を計測した(写真4)。計測は加熱開始直後から100秒まで1秒間隔で行った。温度分布の確認は赤外線サーモグラフィ装置にて行った。計測は加熱開始直後から100秒まで10秒間隔で行い、100秒後に加熱装置を取り除きを行った。

加熱上昇の結果を図2に示す。誘導加熱装置は加熱後約10秒から温度が上昇し50秒で約30度上昇し100秒で45度上昇した。一方、シリコンラバーヒーターは加熱直後から温度上昇がなく一定の値を保つ結果を得た。

図3に誘導加熱装置とシリコンラバーヒーターの温度分布(0秒、20秒、50秒、70秒、100秒)を示す。誘導加熱装置は時間の経過とともに温度領域が広がっているのが確認できる。100秒後の温度分布から誘導加熱装置直下は約100℃に達していることが確認できる。一方、シリコンラバーヒーターは加熱開始直後からヒーター自身の温度上昇が確認できるが鋼材の温度の広がり確認できなかった。100秒直後の温度分布においても温度分布の広がり確認できなかった。

以上から開発した誘導加熱装置はシリコンラバーヒーターと比較して短時間に鋼材を加熱可能なことが確認でき、高い加熱性能を保有することが分かった。

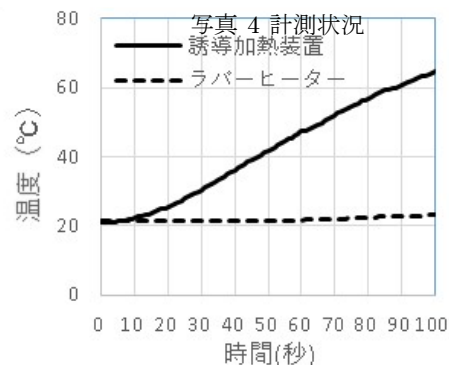
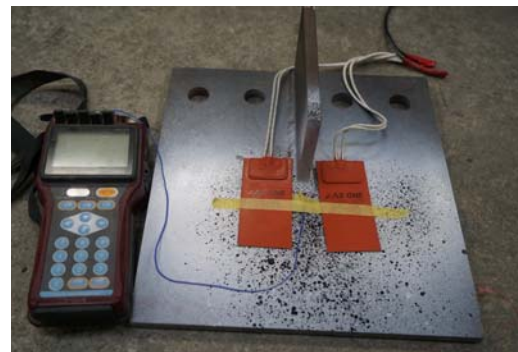


図2 温度上昇



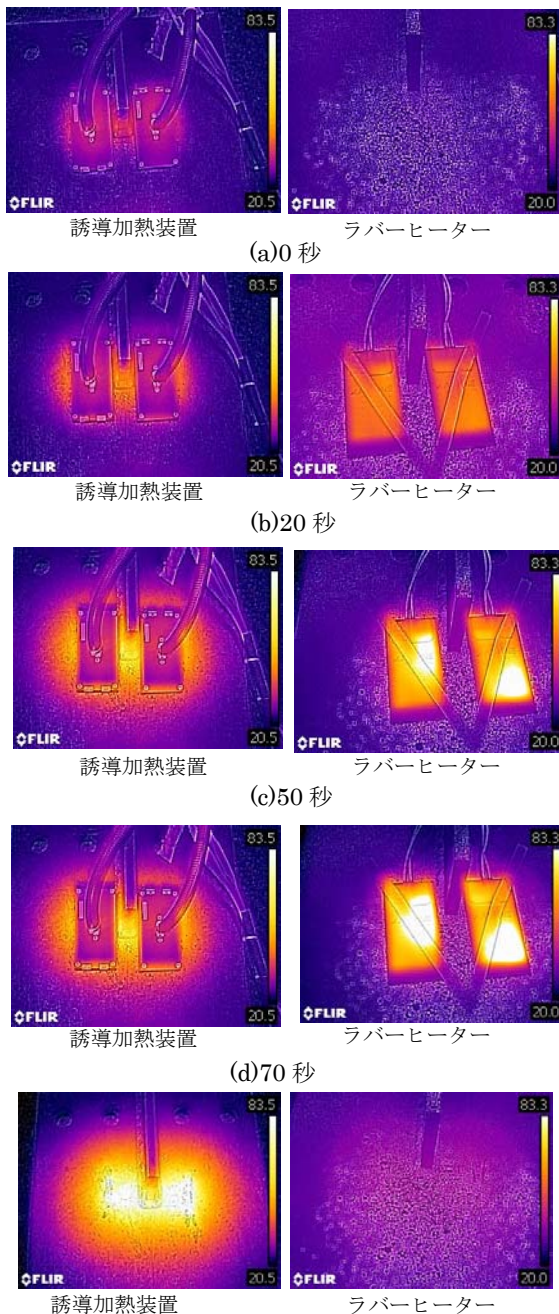


図 3 温度分布

#### (4) 亀裂検出性能の実験

試験体は長さ 650 mm, 幅 300mm, 厚さ 12mm の横板に長さ 290mm, 幅 99mm, 厚さ 7mm の縦板を溶接した。材質は SS400 である。疲労試験機を用いて亀裂を発生させた。試験終了後、スプレーで亀裂の上から塗装した。この試験体を用いて開発した手法での亀裂検出実験を行った。先だって浸透探傷試験, 磁粉探傷試験を行い亀裂の確認を行った。浸透探傷試験 (写真 5) では亀裂長さは約 70 mm だった。一方, 磁粉探傷試験 (写真 6) では亀裂長さが約 85mm だった。また, 左右の亀裂は 2 つに分かれていた。このことから磁粉探傷試験の亀裂検出性能が高いことが分かる。ルーペでの亀裂幅の確認を行った結果, 亀裂幅は,

0.01mm~0.07mm である。

誘導加熱探傷法の計測手順としては最初にデジタル画像相関法の解析に必要なランダムパターンを水性スプレーで施した。その後, 亀裂近傍箇所に計測装置を取り付けた。そして, 初期画像として加熱前の画像を計測した。その後, 加熱装置 (誘導加熱装置・シリコンラバーヒーター) を亀裂の直上に設置して加熱を行った。既定の加熱時間 (20 秒, 40 秒, 60 秒, 80 秒, 100 秒) に達したら加熱装置を外して画像を計測した。そして, 初期画像と加熱画像の 2 つの画像を用いてデジタル画像相関法により解析して亀裂開閉のひずみ変化を可視化して亀裂の有無を確認した。計測・加熱状況を写真 7 に示す。



写真 5 浸透探傷試験結果

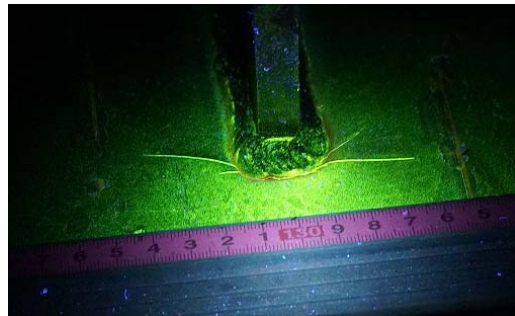


写真 6 磁粉探傷試験結果

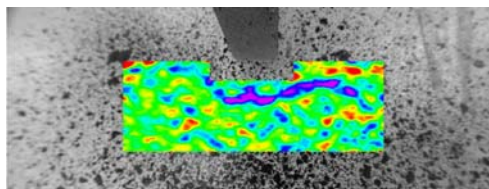


写真 7 計測・加熱状況

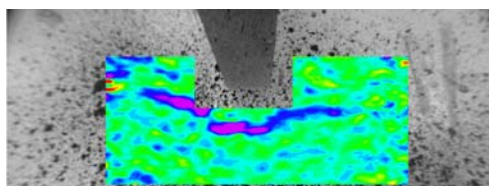
デジタル画像相関法により得られたひずみ分布を図 4, 5 にそれぞれ示す。誘導加熱装置の結果から加熱 20 秒から亀裂の位置にひずみ集中が確認でき 40 秒からそのひずみが鮮明になった。その後 100 秒まではあまり変化がなかった。左右の 2 つに分かれる亀裂は検知できなかった。一方, シリコンラバーヒ

ーターの結果では100秒経過しても亀裂の直上にひずみ集中は確認することができなかった。

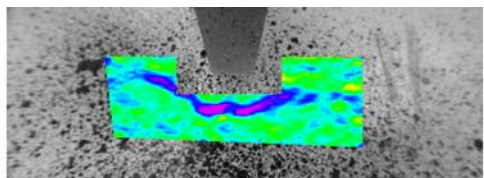
このことから開発した装置は約40秒加熱すれば亀裂を検出可能なことが分かった。また、シリコンラバーヒーターでは亀裂を検出することができないことが確認できた。



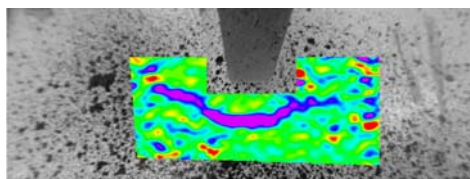
(a)20秒



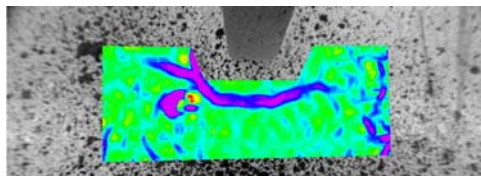
(b)40秒



(c)60秒

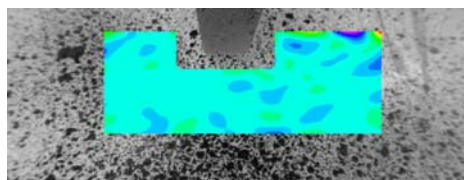


(d)80秒



(e)100秒

図4 計測結果(誘導加熱装置)



(a)100秒

図5 計測結果(シリコンラバーヒーター)

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者, 研究分担者及び連携研究者には下線)

〔学会発表〕(計 1件)

出水亨, 伊藤幸広: デジタル画像を用いた新しい鋼部材の亀裂検出システムの開発, 九州地区総合技術研究発表会, 2018年3月

〔その他〕(計 2件)

- ① 九州建設技術フォーラム 2017(2017年10月18日(水)~2017年10月19日(木))においてポスター展示
- ② ながさき建設技術フェア 2017(2017年10月24日(火)~2017年10月25日(水))においてポスター展示

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

出水 亨 (DEMIZU, Akira)

長崎大学・工学研究科・技術職員

研究者番号: 00533308