

技術資料

デジタルカメラを用いた 鋼材の革新的亀裂検査法の開発

長崎大学 出水 享・松田 浩
佐賀大学 伊藤 幸広

1. はじめに

近年、道路橋の鋼製橋脚や鋼床版等の部材に疲労亀裂の発生する事例が増加している。疲労亀裂⁽¹⁾⁽²⁾は外力による繰り返しによって構造的な応力集中部や溶接形状や溶接欠陥等に起因する応力集中部に発生し、発生部位によっては、進展すると脆性破壊を引き起こし、橋梁の安全性に重大な影響を及ぼす恐れがある。したがって、それらを早い時期で発見し、適切な補修・補強⁽³⁾などの対策を施すことが重要である。

一般的に鋼橋の実現場で多く用いられている亀裂の検査手法⁽⁴⁾⁽⁵⁾として、磁粉探傷試験（以下、MT）や浸透探傷試験（以下、PT）などの非破壊検査手法が挙げられる。しかし、これらの手法は塗装を除去しなければ検査できないことや、広範囲を検査するには時間を要するなどの問題点がある。MTやPTは、近接目視点検で塗膜割れ（写真1）が確認された箇所で実施するが、塗膜割れが確認されたからといって母材に亀裂が発生しているとは限らない。つまり、検査が空振りに終わることがある。検査箇所は塗装を除去しているため、再塗装を行う必要もある。

そこで、本研究では、上述する問題を解決するためには鋼橋の塗装を除去することなく、短時間でかつ広範囲に亀裂を検査可能な技術の開発を行った。本稿では、開発手法の検証実験と実

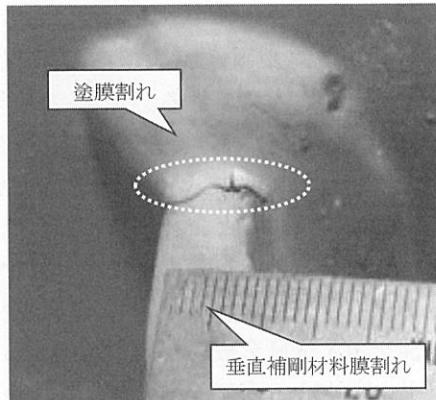


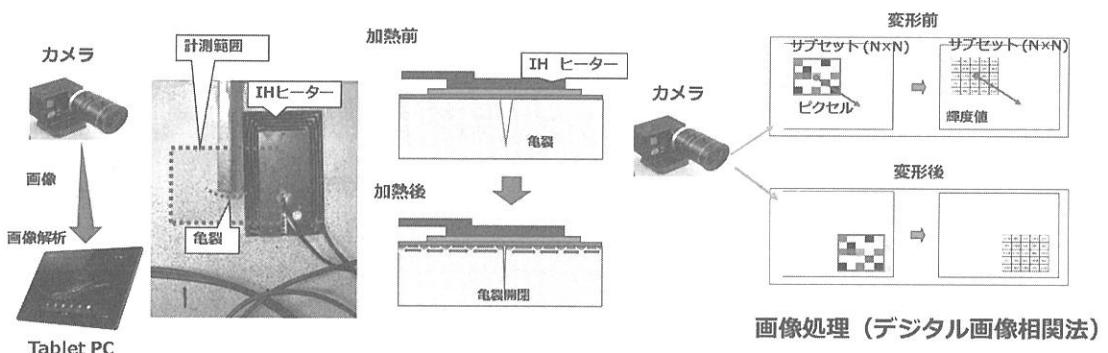
写真1 塗膜割れ

橋梁に適用事例について紹介する。

2. 亀裂検査手法

第1図に開発した検査法の概要を示す。検査法は塗装の上から誘導加熱装置により鋼材を直接加熱して、亀裂を強制的に開口・閉口させ、その変化を光学的全視野計測法⁽⁶⁾の一つデジタル画像相関法^{(7)~(9)}（以下、DICM）によって可視化する手法である。計測システムは、デジタルカメラ、照明、タブレットPC、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。

DICMは、対象物表面の模様のランダム性を基にして、変形前後の対象物表面をデジタルカメラで計測したデジタル画像を画像処理するこ



第1図 検査法の概要

とにより、計測範囲全体にわたって変位の大きさと方向を求めることができる手法である。解析原理は、デジタル画像が256階調で表現され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。計測対象物が変形すると、変形後のサブセットの位置は変化する。変形後のサブセットを対象に、変形前のサブセットの階調値分布と最も高い相関性を示す位置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、変位を算出する。この処理を画像全域で繰り返すことによって、変位分布を得ることができる。ひずみの算出は、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、変形前後の二点間の長さの変化（ひずみ）を求める。この解析の特長として、水平、垂直、斜め、最大・最小主ひずみを求めることが可能であること、任意に解析点の距離を変えること、すなわち解析ゲージ長の自由な選択が可能となること、などが挙げられる。

3. 検査手法の検証

3-1 試験・解析概要

亀裂付近拡大図を写真2に、試験体の概要を第2図に示す。なお、第2図中のAB間は亀裂をまたぎ、50mmとする。試験には、長さ650mm、幅300mm、厚さ12.2mm、亀裂長さ155mmで、

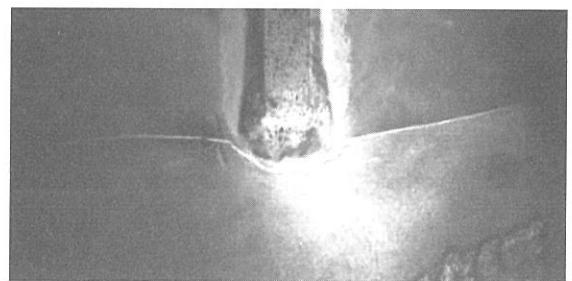
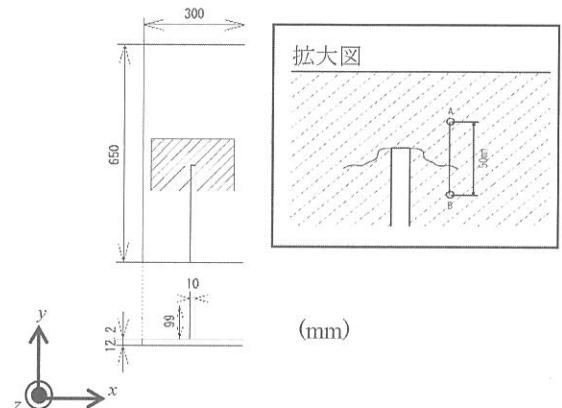


写真2 亀裂付近拡大図



第2図 試験体概要

橋梁塗装が施された試験体を用いた。橋梁塗装は、変性エポキシ樹脂とウレタン樹脂塗料を用い、厚さは約240 μm とした。加熱にはパナソニック社製IHヒーター（約140～190°C）を用い、亀裂部の真裏に設置した。なお、加熱温度は100°C程度とし、塗膜に影響はないものと考えられる。計測に関しては、DICMと赤外線サー

モグラフィを用いて、試験体を加熱する過程を10秒間隔で計測した。

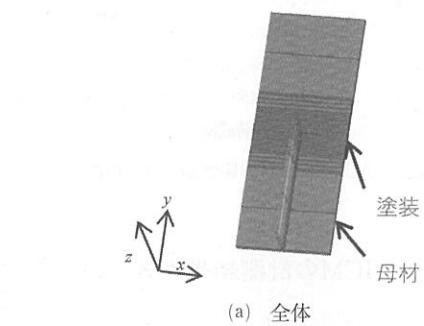
DICMでの計測結果の妥当性を検討するため、汎用有限要素解析コードMarcを用いて解析を行った。解析モデルは8節点ソリッド要素を用い、全体モデルとした。モデルの寸法は試験体と同様で、簡易化のために亀裂深さは6mm、亀裂幅は0.03mmとした。なお、可視化できる亀裂幅はカメラの画素数や撮影距離によって変わるもの、本研究では亀裂幅0.02mm以上を検知できるように設定した。亀裂形状においては要素を作らずに直線で再現した。塗装厚さは、実際の試験体の塗装を膜厚計で複数点計測し、その平均値を採用した。第3図に全体モデルと亀裂部拡大のメッシュ分割図を示す。亀裂周辺は熱の影響が大きいため、メッシュ分割は細かくし、亀裂から離れた部分は、解析時間短縮のため、メッシュ分割を細かくした。なお、解析モデルにおける母材および塗装の要素数はそれぞれ12,540、3,192である。

モデルの加熱に関しては、実際の試験と同じような加熱状態を再現した。また、加熱位置は、DICM計測面裏側である亀裂直下の位置とした。

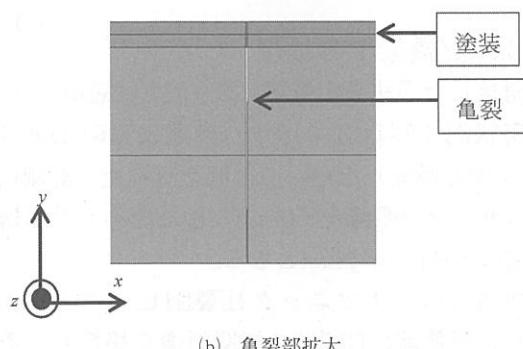
解析で使用した各種パラメータを第1表に示す。すべてのパラメータで温度依存性を考慮しなかった。これは、加熱は100°C程度までであり、温度依存性が解析結果に与える影響は小さいと考えられるためである。

第1表 解析パラメータ

物理量	単位	母材	塗装
静弾性係数	N/mm ²	210000	3100
比熱	J/ton・°C	469000	1100000
熱伝導率	W/Cmm	0.055853	0.0003
熱膨張率	/°C	0.000012	0.00004
比重	ton/mm ³	785000	185000
ポアソン比	—	0.3	0.34
初期温度	°C	20	20
周辺温度	°C	20	20



(a) 全体



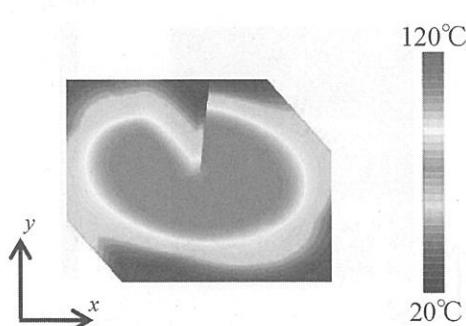
(b) 亀裂部拡大

第3図 解析モデル

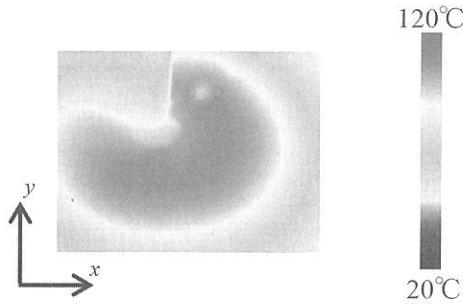
3-2 試験・解析結果

FEMおよび赤外線サーモグラフィによって得られた温度分布図を第4図、第5図に示す。これらの図より、FEMは温度の広がり方、試験体の温度を精度よくシミュレートできていることが確認できる。

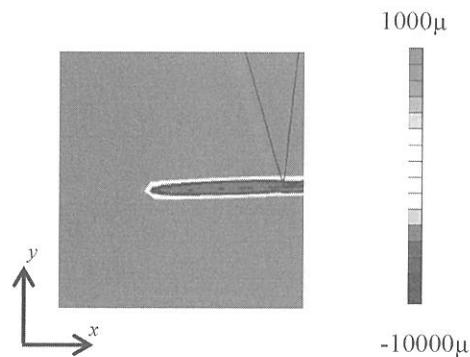
FEMによって得られたひずみ分布図を第6



第4図 温度分布図 (FEM)

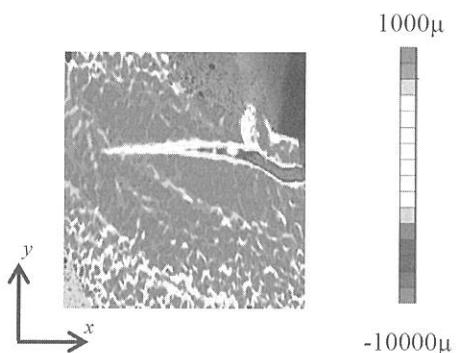


第5図　温度分布図(サーモグラフィ)



第6図　ひずみ分布図(FEM)

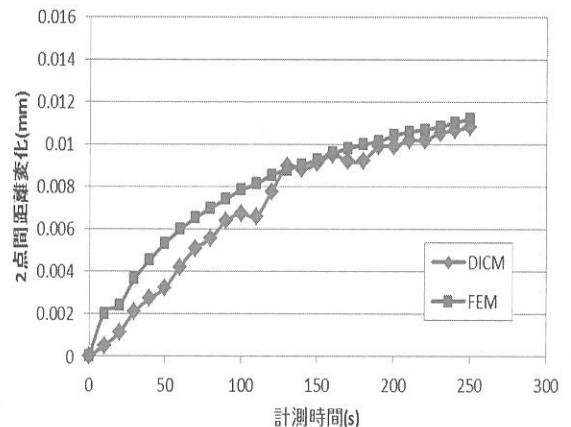
図に示す。第6図より、亀裂の中心部から先端まで $10,000\mu$ 以上の圧縮ひずみが生じていることがわかる。DICMによって得られたひずみ分布図を第7図に示す。第7図より、亀裂先端まで圧縮ひずみが生じていることから、亀裂を正確に計測できていることがわかる。なお、本試験では亀裂部裏面から加熱しているため、裏面が反る。したがって、亀裂は閉じ、亀裂部には



第7図　ひずみ分布図(DICM)

圧縮ひずみが生じている。また、亀裂の中心部では約 $10,000\mu$ の圧縮ひずみが発生しており、その圧縮ひずみは先端になるにつれて低下している。したがって、FEM解析によるひずみ値と、DICMによるひずみ値がほぼ一致していることが確認できる。

また、第3図内の亀裂をまたぐ、AB間の2点間距離経時変化率を第8図に示す。第8図より、FEMおよびDICMのAB間の2点間距離経時変化率がほぼ一致していることが確認できる。なお、第8図ではAB間の2点間距離経時変化率を表すため、亀裂が閉じる方向に距離が大きくなっているが、ひずみの値はマイナスである。



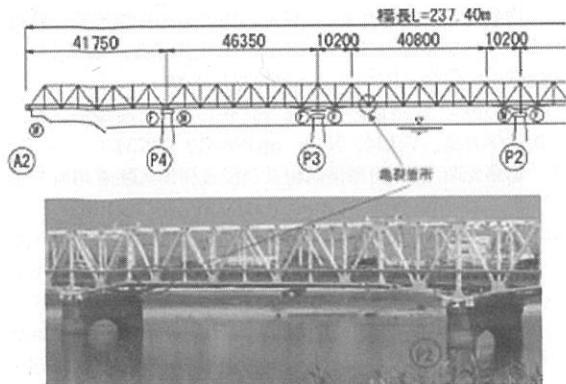
第8図　AB間の2点間距離経時変化率

以上より、DICMの計測結果の妥当性が確認できた。

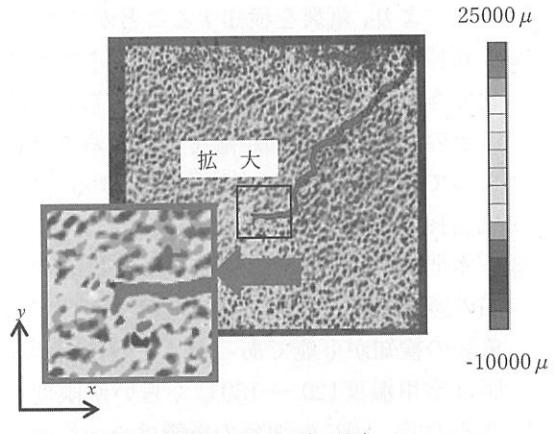
4. 実橋梁での検証

開発した手法を実橋梁(第9図)に適用した。計測状況を写真3に示す。計測にはCCDカメラ(500万画素)を用いて計測を行った。計測面からカメラの距離を650mmとしたため、撮影解像度は0.044mm/pixelとなる。

加熱にはパナソニック社製IHヒーターを用いた。加熱前にDICMで初期画像を撮影し、その後、IHヒーターで亀裂面を加熱した。亀裂



第9図 調査橋梁



第10図 ひずみ分布

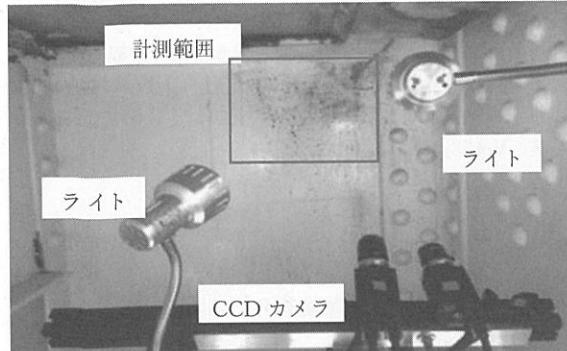


写真3 計測状況

面が約100°Cに上昇したら加熱を止め、DICMおよび赤外線サーモグラフィで計測を行った。試験においては、事前に計測面に黒色のスプレーでランダムパターンを塗布した。これはDICMの計測に必要なためである。また、亀裂検知の精度検証を行うために、計測後にMTを行い比較を行った。

DICMにより計測したひずみ分布を第10図に示す。図より右上から左下に延びる亀裂が計測できていることがわかる。また、亀裂先端が二股に分かれていることも確認できる。本試験では亀裂面側から加熱を行っているため、膨張により亀裂が開き、亀裂面には引張ひずみが生じている。MTによって確認された亀裂部分を写真4に示す。写真より、亀裂長さは約75mmで、亀裂先端が二股に分かれていることがわかる。

DICMとMTの結果を比較すると、DICMはほぼ亀裂を検知できていると考える。ただし、DICMでは、亀裂先端の二股を細部まで検出できなかった。この原因として、カメラの画素数が500万画素と低いことから撮影解像度を向上させることで解決できると考える。

5. おわりに

本稿では、熱的負荷を用い、鋼部材の熱変形に伴う亀裂の開閉をDICMで計測することにより、鋼部材の亀裂や塗装不良を検知する計測方法を紹介した。本研究で得られた結果は以下のようにまとめられる。

- ① 热的負荷を与えることにより、鋼部材に生じている亀裂の開閉をDICMで計測する

- ことにより、亀裂を検知することができた。
- ② 現段階では0.02mmの表面亀裂まで可視化できることを確認している。さらに、カメラの解像度と撮影距離を考慮することによって撮影範囲を任意に調節できるので、亀裂長においては制限はない。
- ③ 本研究では100°Cの加熱により亀裂の検知の照査を行ったが、80°C程度においても亀裂の検知が可能であった。一般塗料用樹脂は常用温度120～150°Cくらいが限度であるので、80°Cの加熱の影響はないものと思われる。
- ④ FEM解析を用いて、亀裂を有する試験体の亀裂、および、その周辺部分の温度・ひずみ挙動をシミュレートすることができた。したがって、DICMの計測結果の妥当性が確認できた。
- ⑤ 実橋梁においても、温度分布および亀裂位置を高精度に可視化することができた。

＜参考文献＞

- (1) 伊藤裕哉・穴見健吾・小林裕介：“鋼下路鉄道橋縦桁横桁連結部の疲労損傷に対する橋梁構造の影響”、土木学会、第65回年次学術講習会、I-116、pp.231-232 (2010)
- (2) 木延彰・工藤伸司：“中央線第二平等川橋梁縦桁損傷とその対策”、SED、No.25、pp.2-9 (2005)
- (3) 増井洋介・内藤孝和：“縦桁に切欠きを持つ溶接下路桁橋りょうの補強対策工について”、土木学会、第60回年次学術講習会、IV-192、pp.383-384 (2005)
- (4) 三好滋：“溶接部の磁粉探傷試験および浸透探傷試験”、溶接学会誌、Vol.44、No.4、pp.298-310 (1975)
- (5) 加藤光昭：“磁粉探傷試験及び浸透探傷試験適用時の留意点”、溶接学会誌、Vol.54、No.3、pp.39-43 (1985)
- (6) (一社)日本非破壊検査協会：“特集：光学的全視野応力・ひずみ計測技術の最近の動向”、非破壊検査、Vol.52、No.3、pp.115-136 (2003)
- (7) 出水享・松田浩・伊藤幸広：“デジタルカメラを用いた橋梁の変位、ひずみ計測に関する研究”、高速道路自動車、Vol.58、No.9、pp.21-27 (2015)
- (8) 出水享・松田浩・戸次翔・森崎雅俊・内野正和・伊藤幸広・森田千尋：“デジタル画像相関法のひずみ計測向上に関する基礎的研究”、土木学会論文集、A2（応用力学）、Vol.68、No.2、pp.683-690 (2012)
- (9) 出水享・松田浩・藤野義裕・伊藤幸広・趙程：“溶接中および冷却過程における鋼材の変形・ひずみ挙動の光学的全視野計測と三次元熱弾塑性FE解析”、構造工学論文集、Vol.58A、pp.40-49 (2012)

【筆者紹介】

出水 享・松田 浩
長崎大学 大学院 工学研究科

伊藤 幸広
佐賀大学 大学院 工学系研究科

新編 温度計の正しい使い方 第5版

日本電気計測器工業会 温度計測委員会編 A5判356頁 定価：2,500円+税

温度計測の基本を平易に解説し、適切な選択の指針も示し、設置・管理・保全については実例を挙げ、中でも業種別の特長的な温度センサの設置例を紹介する。初心者には温度計の正しい使い方が会得でき、専門技術者や研究者には知識の整理に役立つガイド。

日本工業出版(株)

フリーコール 0120-974-250 <https://www.nikko-pb.co.jp/>