赤外線サーモグラフィを用いた 鋼・コンクリート合成床版の疲労損傷の 検出および評価に関する研究

水野 浩¹・和泉 遊以²・中野 好祐³・阪上 隆英⁴・松井 繁之⁵

¹正会員 川田工業株式会社鋼構造事業部技術部 (〒550-0014 大阪市西区北堀江1-22-19)

E-mail: hiroshi.mizuno@kawada.co.jp

²正会員 滋賀県立大学助教 工学部 (〒522-8533 滋賀県彦根市八坂町2500)

E-mail: izumi.yu@mech.usp.ac.jp

³非会員 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

[現在, 住友ゴム工業株式会社に勤務]

E-mail: kosuke-nakano.az@srigroup.co.jp

⁴正会員 神戸大学教授 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1)

E-mail: sakagami@mech.kobe-u.ac.jp

⁵フェロー 大阪大学名誉教授・大阪工業大学客員教授 (〒614-8289 京都府八幡市美濃山一ノ谷4)

E-mail: shigeyuki.matsui@oit.ac.jp

これまで建設された鋼・コンクリート合成床版の維持管理を適切に行うために、鋼板下面から床版内部の健全性が確認できる合理的な非破壊検査手法の確立が望まれている。ロビンソン型合成床版では、鋼板とコンクリートの結合構造であるスタッドジベルは、交通荷重の繰り返し载荷による疲労損傷に注意が必要な部位である。本研究では、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定法に着目し、合成床版を用いた輪荷重走行試験を実施、スタッド周辺で疲労亀裂が発生・進展するまでの間、床版下面の応力分布を熱弾性応力計測により定期的に計測した。得られた応力分布とFEM解析を比較することで、本手法によりスタッドジベル溶接部の疲労損傷の検出・評価が可能であることを示した。

Key Words : *steel plate-concrete composite deck, non-destructive inspection of studs, infrared thermography, wheel load running test, fatigue damage, infrared stress measurement*

1. 概 要

(1) 研究の背景

鋼・コンクリート合成床版（以下合成床版と略記する）は、輪荷重走行実験など各種試験で疲労耐久性が高いことが証明された床版形式のひとつであり、わが国ではこれまで数多く建設されている。合成床版はRC床版やPC床版と異なり、床版下面からは内部の状態を目視で確認することができない。そのため、これまでに建設された合成床版の維持管理を適切に行っていくためには合理的な非破壊検査手法を確立する必要がある。

平成19年10月に「道路橋の予防保全に向けた有識者会議」が開かれ、翌年に予防保全に向けた取り組みについて提言¹⁾された。この中で、予防保全を実現するために

写真-1 コンクリート打設前のロビンソン型合成床版

写真-2 輪荷重走行試験状況

は、点検、診断、補修補強の各分野でより良質かつより少ない負担で維持管理の実施を可能とする技術開発が重要であると提言されている。既存インフラの効率的な点検手法として赤外線サーモグラフィは有効と考えられる。

ロビンソン型合成床版は、数ある合成床版形式の中でも施工性・構造的性に優れ、これまで数多くの橋梁に適用されている。本形式は、写真-1に示すように、鋼板とコンクリートがスタッドジベルで一体化され輪荷重に抵抗する構造である。このスタッドジベルはロビンソン型合成床版の重要な要素であり、交通荷重の繰返し载荷による疲労損傷に注意が必要である。しかし床版下面に鋼板があることから内部の状態を目視で確認することができない。合成床版を適切に維持管理するためには、スタッドの損傷を適切にモニタリングするとともに、損傷の危険度を定量的に評価する必要がある。しかしながら、これらを可能とする検査方法はいまだ確立されていない。

(2) 既往の研究

阪上の研究²⁾では、赤外線サーモグラフィによる構造材料表面の熱弾性応力計測結果に基づき、遠隔から疲労亀裂を検出・評価する手法の開発が行われている。熱弾性応力測定によれば供用下での車両輪荷重作用下での鋼橋梁、とりわけ鋼床版溶接部の疲労亀裂先端近傍の応力変動を計測することが可能となってきた。

コンクリート橋の分野では、赤外線サーモグラフィを用いた断熱温度場法による点検手法に関する研究が盛んに行われている。中村らの研究³⁾では、かぶりコンクリートが鉄筋腐食などによりはく落する危険度を予測する手法に関する研究が行われている。

合成床版のコンクリートの充填性や滯水の有無など健全性の診断に適用可能な非破壊検査手法として、弾性波を用いた打音法⁴⁾が挙げられる。打音法は空隙や滯水を定量的に分析可能であり検査結果の信頼性が高い反面、検査者が計測器をもって床版下面を打撃する必要がある。

(a) 底鋼板

(b) 配筋およびコンクリート

図-1 試験体形状

広範囲の床版面を検査するには多大な労力が必要である。
またその結果は点で捉えた結果を周波数分析したもので
可視化しにくいものとなっている。

著者らの過去の研究⁵⁾では、赤外線サーモグラフィを用いた断熱温度場法に基づいて、ロビンソン型合成床版のまだ固まっていないコンクリートの充填性を評価する手法提案した。さらに、供用中の合成床版のスタッド疲労損傷を熱弾性応力測定により非破壊的に検出・評価する新しい手法を提案し、輪荷重走行試験による基礎検討を行ってきた。しかしながら、疲労破壊までの応力分布の変化傾向を得るには至らなかった。

(3) 本研究の目的

本研究では、合成床版を用いた輪荷重走行試験を実施し、スタッド周辺で発生する疲労亀裂による応力分布を熱弾性応力計測法により定期的に計測する。そして、得られた熱弾性応力の照査のため、FEMによる応力解析を行い、本手法によるスタッド疲労損傷検知および評価の

図-2 本研究で対象としたスタッド

図-4 荷重回数と載荷荷重の関係

図-3 荷重試験方法

表-1 試験体コンクリートの強度試験結果

	標準(水中)養生		現地(気中)養生(試験開始時)		
	養生 日数	圧縮強度 (N/mm ²)	養生 日数	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)
プレキャスト部	28日	36.1	32日	33.8	27.7
間詰め部	3時間	24.5	1日	33.0	25.6
	28日	49			

当)には橋軸方向に1～8, 直角方向にA～Hとして格子状に番号を付した。

(2) 荷重試験方法

輪荷重荷重方法の概要を図-3に, 荷重回数と載荷荷重の関係を図-4にそれぞれ示す。本実験はプレキャスト合成床板の疲労耐久性を確認する目的で行った⁹⁾。輪荷重試験は、写真-2に示すクランク式輪荷重試験機を用い、1分間に走行範囲2.0mを25往復する速度で試験を行った。なお、輪荷重は鉄輪であり、図-2, 3に示す載荷ブロックを介して荷重を与えた。80万回までは実橋で100年間に相当する疲労損傷を与える試験(試験1)である。80～100万回の間は、連続合成桁の中間支座部の負曲げモーメントにより、合成床版の橋軸方向鉄筋に発生する応力と等価な応力を発生するジャッキアップ荷重を試験体中央で載荷させる走行実験を行った(試験2)。なおこれらの間については、赤外線計測は行っておらず、その後の荷重回数100万回以降に、熱弾性応力測定によるスタッドの損傷検出・評価に着目した試験(試験3と略する)を行った。

試験3では、載荷荷重147kNの予備載荷を10万回与えた後、スタッドに損傷を与えることを目的に206kNで載荷を行った。その後230kN, 260kNと段階的に荷重を引き上げ、最終的に317万回まで載荷を行った。

疲労試験中は、定期的に赤外線計測を実施し、底鋼板下面の応力分布の変化を観察した。熱弾性応力測定には、温度分解能0.025℃のSC7500 (FLIR社製)を用い、測定

有効性・適用性を明らかにする。

2. 輪荷重走行試験機を用いたロビンソン型合成床版スタッドの疲労損傷の検出実験

(1) 試験体の概要

試験体の概要を図-1, 2に、コンクリート強度試験結果を表-1に示す。試験体は橋軸(長手)方向に幅200mmの継手部を有するロビンソン型の合成床版であり、その寸法は長さ3300mm×幅2350mm×厚さ160mm(底鋼板 $t=8$ mm含む)である。なお本試験体はプレキャスト合成床版の継手構造に着目した試験⁹⁾に用いた試験体である、左側のパネル(パネル1)と右側のパネル(パネル2)を中央の継手部で結合している。図-2に示すように本研究で対象とするスタッド(径 $\phi 16$, 長さ $l=110$ mm, SS400相

(a) ノイズ改善前

(b) ノイズ改善後

図-5 自己相関ロックイン処理による応力分布のノイズ改善 (例)

面の応力変動に伴う温度変動を撮影速度157 Hzで計測した。赤外線カメラと計測面の距離は1m程度であり、気温約25~35℃の室温状態で試験を行った。

(3) 熱弾性応力測定方法

熱弾性応力計測によれば、動的荷重下の応力変動に伴う温度変動を赤外線カメラで計測することにより、材料表面における主応力和分布の変化を得ることができる。

材料が弾性範囲内で荷重を受ける場合、荷重の繰返し速度が断熱条件を満たす程度に十分大きければ、主応力和の変化 $\Delta\sigma$ と温度変化 ΔT との間には、次式(1)で示す関係が成立する。

$$\Delta T = -K_m \cdot T \cdot \Delta\sigma \quad (1)$$

ここで ΔT は温度変化量、 K_m は材料の熱弾性係数、 T は絶対温度、 $\Delta\sigma$ は主応力和の変化量である。よって赤外線サーモグラフィを用いて視野内の温度変化量 ΔT を測定することにより、主応力和の変化量 $\Delta\sigma$ の分布を得ることができる。

(4) 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法²⁾

応力変動に基づく温度変動は、計測ノイズと同程度の微小なものである場合が多い。熱弾性応力測定の高精度化のためには、赤外線計測データと応力変動に関する参

表-2 FEM解析の概要

項目	FEM解析	
解析コード	Abaqus	
要素数	290,096	
節点数	317,039	
解析方法	弾性解析	
底鋼板・横リブ	シェル要素	$E_s=20 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$
PCaコンクリート	ソリッド要素	$E_c=28 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.167$
間詰コンクリート	ソリッド要素	$E_c=33 \times 10^4 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.167$
スタッド(一般)	棒要素	$E_s=20 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$
スタッド(詳細)	ソリッド要素	$E_s=20 \times 10^5 \text{ N/mm}^2$, $\nu=0.3$
接触条件	Contact	

照信号とのロックイン相関処理を行うことにより信号対雑音比 (以下S/N比と略す) を改善する必要がある。

従来のロックイン処理では、応力変動に関する参照信号を、被測定物に取り付けたひずみゲージやロードセルなどから外部入力していた。しかしながら、遠隔から大型鋼構造物の応力集中部や亀裂の検出を行う場合には、ロックイン計測に必要な参照信号を引出すことが不可能な場合が多く、仮に参照信号を引き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。さらに従来型のロックイン処理は実構造物で想定される実働荷重下の任意荷重に対応できるものではなかった。

自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィでは、赤外線計測画像内の亀裂先端付近の一部領域の温度変動データから参照信号を自己生成し、すべての領域の温度変動データとロックイン相関処理を行う。これにより、外部からの参照信号が不要で、任意荷重に対応した遠隔からのロックイン計測が可能となる。

鋼床版のデッキプレートとUリブの間の溶接ビード上を進展し、その後Uリブ側へ屈曲した亀裂を対象に熱弾性応力測定⁷⁾を行った結果の一例を図-5に示す。図中の目盛は、対象物に金属製のスケールを貼り付け同時に撮影を行っている。図-5(a)および(b)は、それぞれ自己相関ロックイン処理を適用する前・後の画像を示している。参照信号は亀裂先端近傍から取得しており、図-5(b)のコントラストは参照信号取得点の応力変動の大きさに対する比率を表わしている。図より、亀裂先端近傍において応力集中が見られる。またロックイン処理により応力集中箇所がより鮮明となっている。

3. 熱弾性応力計測結果とFEM解析結果との比較

(1) FEM解析の概要

赤外線応力計測で得られた応力測定結果の妥当性を確

(a)モデル化の概要

荷重位置	荷重荷重(kN)	面圧 (N/mm ²)
CASE1 荷重(1)	50	1.0
CASE2 荷重(2)	50	1.0
CASE3 荷重(3)	50	1.0
CASE4 荷重(4)	50	1.0
※CASE5 荷重(5)	50	1.0

※CASE5を、各ケースの応力から差し引きする。

(b) 荷重・支持条件

(c) 接触条件

図-6 FEM解析の概要

(a) CASE1

(b) CASE2

(c) CASE3

(d) CASE4

図-7 主応力分布 (底鋼板下面)

認するため、試験体モデルのFEM解析を実施し、スタッド周辺の応力分布を確認した。FEM解析の概要を表-2および図-7に示す。図-6(a), (b)および(c)に、それぞれモデル化の概要、荷重・支持条件および接触条件を示す。解析コードとしてはAbaqusを用い、弾性解析を行った。図-6(a)に示したように、底鋼板および横リブはシェル要素であり、コンクリートはソリッド要素でモデル化した。また、輪のエッジから45°で仮定したせん断面を通るスタッドであり、赤外線応力計測において最も顕著に損傷が観察されたF3を中心とした9本のスタッドについてはソリッド要素で詳細にモデル化し、それ以外のスタッドは棒要素でモデル化した。引張側のコンクリート要素に

図-8 E3スタッドの熱弾性温度分布画像

図-9 F3スタッドの熱弾性温度分布画像

図-10 G3スタッドの熱弾性温度分布画像

は、図-6(a)に示すように、スタッド間に1か所、底鋼板上面から、引張側コンクリートを無視した断面計算で求められた中立軸位置(55mm)まで、節点を共有しない垂直方向のひび割れをモデル化した。これは橋軸方向、直角方向とも床版のソリッド要素に様にモデル化した。

荷重は図-6(b)に示したように、100kN(本モデルは1/2対称モデルであり50kNを載荷)を面圧($1\text{N/mm}^2 \times 200\text{mm} \times 250\text{mm} = 50\text{kN}$)で載荷した。荷重の載荷位置(1)~(4)をそれぞれCASE1~CASE4としている。CASE2はF3スタッドに最も近接した位置であり、CASE3は版の中央付近である。なお、着目するスタッドから最も離れた位置の載荷ケースをCASE5とし、赤外線計測条件を合わせるため、CASE1~CASE4で発生する底鋼板の応力からCASE5の底鋼板応力を控除している。接触条件は、図-6(c)に示したように、コンクリートと鋼板、またコンクリートと詳細モデル化したスタッドの間は、支圧力が働くと力が伝達され、離れる方向に働く場合は力が伝達されないものとした。ただし、間詰コンクリート部では、高力ボルトの頭部がコンクリートを拘束すると考えられるため、底鋼板のシェル要素と間詰コンクリートのソリッド要素は節点共有するものとしてモデル化した。

(2) 計測結果との比較

FEM解析により得られた底鋼板下面の主応力分布を図-7に示す。図は100kNを載荷した時の結果であり、底鋼板下面から見上げるように表示している。図中の赤色のベクトルは引張応力を示し、青色は圧縮応力を示している。F3スタッド近傍では、載荷位置の移動とともに圧縮応力と引張応力が回転する、いわゆる回転せん断がみられる。しかしながら、E4スタッドではそのような挙動は見られない。この要因としては、E4スタッドが継手部に位置しているためにボルト頭部によるコンクリートの拘束が生じていること、また、スタッドが輪荷重直下に位置していることが考えられる。

図-8、9および10に、それぞれE3、F3およびG3スタッド周辺の熱弾性温度分布画像を示す。本図は、輪荷重が着目するスタッドから最も遠ざかったタイミングの温度分布から、着目スタッドに最も近づいたタイミングの温度分布の差分を取った画像である。ここに係数を乗じることで主応力の変化量となる。スタッド中心の下側(載荷中心側)が圧縮応力を示す白色、上側が引張応力を示す黒色となっている。F3スタッドに最も近接した位置に載荷した図-7(b)と比較すると、同様の傾向がみられる。

E3、F3、G3スタッド周辺で得られた赤外線計測結果・FEM解析結果を図-11(a)、(b)および(c)にそれぞれ示す。また、熱弾性温度分布画像をそれぞれ図-8~図-10

(a) E3 スタッド

(b) F3 スタッド

(c) G3 スタッド

図-11 スタッド周辺の底鋼板表面主応力和変化量の分布(206kN)

中に示す。概ね温度差 0.1°C で約 100N/mm^2 となる。図は、図-8, 9および10に示したライン上の主応力和の変化量の分布を示している。赤外線計測結果は載荷荷重 206kN 載荷時に得られたものである。FEM解析結果は、 100kN 載荷したCASE1~4の解析結果から、CASE5(着目スタッドから最も遠ざかった載荷ケース)の結果を差し引き

(a) エッジ部からの集中載荷の場合のせん断力分布

(b) 載荷ブロックから等分布載荷の場合のせん断力分布

図-12 床版に作用するせん断力(単純梁と仮定)

表-3 応力差 (N/mm²)

	FEM解析	100万回	200万回	317万回
E3スタッド	136	80	100	100
F3スタッド	179.9	130	100	100
G3スタッド	147.5	120	160	120

し、赤外線結果との比較のため 2.06 倍した結果である。なお、赤外線計測については載荷回数 100 万回、 200 万回、および 317 万回時に得られた結果を示している。図-11より、F3スタッドおよびG3スタッドでは、赤外線計測およびFEM解析ともに各スタッドの圧縮応力と引張応力が反転する応力分布性状が表れていることが分かる。

各スタッドの圧縮応力と引張応力の差を表-3にまとめる。この応力差は、計測された主応力和の細かな凹凸を全て有効と考え、最大値(引張)と最小値(圧縮)の差の絶対値である。赤外線計測結果は、F3スタッドは載荷回数 100 万回時点は最も大きい応力差が生じており、 100 万回以降は応力差が小さくなっている。一方、E3スタッド、G3スタッドは 100 万回時点の応力差に比べて応力差が大きくなっている。これは、F3スタッドに亀裂が発生したことにより、周辺のスタッドにせん断力が再配分

図-13 スタッドの変形とyz方向せん断応力分布(100kN)

されたことも考えられるが、解析的検証については行っていないため今後明確とする必要がある。

次にE3スタッドに注目する。図-11(a)に示したE3スタッドの赤外線計測結果では、圧縮応力と引張応力が反転

図-14 自己相関ロックイン処理による相対応力分布
(載荷回数 317 万回)

写真-3 合成床版下面の可視画像
(載荷回数 317 万回)

する明確な性状が現れていない。実験では剛性の高い鉄輪や載荷ブロックを介して載荷されているため、図-12(a)に示すように、載荷ブロックのエッジ部から集中的に載荷されていたことが考えられる。その場合、載荷ブロック直下のスタッドに発生するせん断力はほとんど発生しないと予測される。一方、FEM解析では等分布の負荷を与えている。この場合、図-12(b)に示すようにエッジに近いE3スタッドでは、エッジ部から集中的に載荷された場合に比べて比較的大きなせん断力が発生している。従って、スタッドに水平せん断力に伴う負荷が作用するため、底鋼板下面には正負反転する応力性状が表れているものと考えられる。

スタッドのせん断応力分布および変形挙動を図-13に示す。図は100kNを載荷した場合の変形、および最もせん断力が大きかったyz方向のせん断応力コンター図を示す。底鋼板との溶接部付近でせん断力が最も大きくなる分布性状となっている。これはコンクリートからの水平せん断力がスタッドの根本付近から伝達されているためである。

図-15 F3スタッドにおける載荷回数ごとの自己相関ロックイン計測結果

4. 赤外線サーモグラフィによる疲労損傷の検出

(1) 計測結果

載荷回数317万回における熱弾性応力計測結果に自己相関ロックイン処理を施した結果を図-14に示す。また、写真-3に計測箇所の可視画像を示す。図-14の応力分布画像左上のF3スタッドにおいて、疲労亀裂に起因すると考えられる応力分布の変状が確認できる。F3スタッドにおける載荷回数ごとの赤外線計測結果を図-15に示す。図中に示すグリッド中心がスタッド中心を示す。図-15(d)の載荷回数210万回時において、矢印に示すスタッド下側に疲労亀裂に起因すると考えられる応力分布の変状が生じている。さらに載荷回数の増加に伴い、応力変状箇所が画面右上方向に移動していることが確認できる。

図-16 F3スタッド周辺の時間応答（載荷回数 100 万回）

図-17 E4スタッド周辺の時間応答（載荷回数 100 万回）

写真-4 コンクリート除去後の状況

(2) 疲労亀裂発生の原因分析

亀裂がまだ生じていないと考えられる載荷回数100万回時におけるF3およびE4の応力分布の時間変化を、図-16および図-17にそれぞれ示す。

図-16のF3スタッドでは、スタッドを中心に圧縮を表す高温部が右下から左下へと回転している様子がみられた。一方、図-17に示すE4スタッドでは、輪荷重直下にあるためF3スタッドのように回転する応力場は計測されず、一方向のせん断力が働いている分布が観察された。

図-18 損傷が検出されたスタッド分布図

既往研究⁹⁾より、回転せん断力がスタッドの疲労損傷発生に寄与していることが分かっている。5.に示すスタッドの損傷状況によると、F3スタッドでは亀裂が発生しているが、E4スタッドでは亀裂が発生していないことが確認されている。図-16および図-17の熱弾性応力計測結果から、スタッド周辺で発生している主応力の変化量は、それぞれF3スタッドでは 117N/mm^2 、E4スタッドでは 125N/mm^2 と同程度であった。F3スタッドにおいて亀裂が発生したのは、スタッドに加わる回転せん断力の影響によるものと考えられる。

5. スタッドの強制曲げによる損傷状況の確認

輪荷重試験終了後、試験体のコンクリートを除去し、スタッドを強制的に曲げてスタッドから進展した亀裂の確認を行った。コンクリート除去後の試験体の状況を写真-4に示す。対象とした全てのスタッドについて、鋼製のパイプで、作用せん断方向である幅員直角方向外側に、損傷を確認しながらスタッドを慎重に曲げ、損傷の有無および状況を確認した。結果を図-18(a)に示す。図中の赤色で着色した丸印は、強制曲げによりスタッドが底鋼板から分離した損傷度の高いスタッドを示している。ま

(a) 赤外線計測結果

(b) 磁粉探傷試験結果 (F3: 試験終了)

図-19 F3 スタッドの赤外線計測結果と磁粉探傷試験の比較

図-20 F3 スタッドの破断状況

た、水色で着色した丸印は、亀裂は確認されたが、強制曲げによるスタッドの分離が見られなかった損傷度の低いスタッドを示している。また、図中の青枠は輪荷重走行エリアを示している。疲労損傷が確認されたスタッドの分布を確認すると、輪荷重の外縁に近接したC列とF列に集中している。載荷ブロック直下では、D1スタッドが1本破断しているものの、ほとんど破断していない。図-18(b)の断面図に示す通り、載荷ブロックの際から 45° の荷重分布線を仮定すると、C、F列はそのライン

6. スタッドの破断面観察

赤外線サーモグラフィで亀裂進展が確認できたF3スタッドについて、その亀裂発生破面の観察を行った。F3スタッドの破壊状況を図-20に示す。亀裂の破面を詳細に確認するため、電子顕微鏡（以下SEMと略す）TM3000Miniscope（HITACHI社製）を用いて観察した。

F3スタッドの破面を図-21に示す。これはSEM観察結果を貼り合わせたものである。画像の左側が溶接ビード側、右側が底鋼板下側を示しており、亀裂はスタッドの溶接ビードから、底鋼板下面へ貫通するように進展していると考えられる。また、溶接ビード側には、図の青矢印で示した二つの段差がみられた。したがって、亀裂は図中に示しているようにa～cのエリアから個々に発生・進展し、その後合体したものと考えられる。このように亀裂の起点が複数個現れたのは、輪荷重による回転せん断により、応力集中が広い範囲に生じたためであると考えられる。また、このような亀裂の起点が複数個現れる様子は、疲労亀裂が発生した他のスタッドにおいても確認された。スタッドに対して回転せん断が加わることで一方向のせん断が加わるより早期にスタッドが疲労破壊する⁸⁾ことが知られているが、本結果はそのことを裏付けるものとなった。

図-21 F3スタッドの破面観察

と交差するスタッドであることが分かる。高力ボルト継手部を挟んだ4, 5列目（C4, C5およびF4, F5）について、荷重ブロック縁のC列, F列のスタッドは他の箇所に比べると損傷が少ない。これは、高力ボルト頭部がずれ止めの効果を発揮し、スタッドに作用するせん断力が低減された結果であると考えられる。また、左側のパネル1（1～3列）の荷重ブロック縁のスタッドは6本全て破断し分離しているのに対して、右側のパネル2（6～8列）のスタッドは、6本中2本のみ分離した。配筋鉄筋が交互に配置されており干渉を避けるため左側（1～3列）のパネル1と右側（6～8列）のパネル2でスタッド配置が異なる。左側のパネルでは、荷重ブロック縁からスタッド中心までの距離が75mmであるのに対して、右側は100mmとなっている。それにより、スタッドに作用するせん断力に差が生じ損傷度合いの違いがみられたものと考えられる。

荷重回数317万回時のF3スタッドの応力計測計測結果（自己相関ロックイン処理）と、試験終了後に行った磁粉探傷試験の結果を比較した。結果を図-19に示す。磁粉探傷試験で得られた亀裂形状を、赤外線計測結果に重ねて緑の点線で示している。図より、亀裂形状は概ね一致しているといえる。また、強制曲げ後、除去したF3スタッドを下面から観察した図-20と比較すると、鋼板下面の亀裂形状と赤外線画像は概ね一致していると考えられる。なおスタッド幹は、SEM観察のため切断している。

7. 結論および今後の展望

本研究では、合成床版の輪荷重走行試験を実施し、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力測定法でスタッド周辺の応力分布を計測し、スタッドジベルの疲労損傷を検出、評価する方法について検討した。その結果、赤外線サーモグラフィを用いて合成床版スタッドの疲労損傷を検出、またその進展を確認することが可能であることが分かった。またFEM解析結果からは、計測結果の妥当性が確認できた。

本研究の結果、以下の知見が得られた。

- (1) 本手法により、ロビンソン型合成床版のスタッド周辺で発生した疲労亀裂を、底鋼板下面に表れた熱弾性応力分布から検出、および評価が可能であることが分かった。
- (2) 赤外線サーモグラフィで計測された底鋼板下面の応力分布は、コンクリートと鋼の接触条件を考慮したFEM解析結果と整合していた。このことから、赤外線サーモグラフィは合成床版の応力変動を的確に捉えているものと考えられる。
- (3) 輪荷重直下のE4スタッドと輪荷重外縁に近接したF3スタッドの応力分布の経時変化より、F3スタッドにおいて亀裂が発生したのは、スタッドに加わる回転

せん断力の影響が大きいと考えられる。

- (4) スタッドの強制曲げにより確認した損傷状況より、疲労損傷は輪荷重とスタッドの位置が関係しており、輪荷重直下のスタッドはほとんど破壊せず、また輪荷重外縁でも、より近接したスタッドの損傷が進行することが分かった。
- (5) 赤外線計測により得られた応力分布から、合成床版底鋼板に現れた亀裂について、概ね形状の確認を行うことが可能である。
- (6) スタッドの破面観察で亀裂発生点が複数見られたことから、回転せん断が亀裂発生・進展に大きな影響を及ぼしていることを確認した。

今回の輪荷重走行試験では、スタッドに疲労亀裂を発生させることを目的に、重交通路線の橋梁で計測した輪荷重による実橋床版の損傷度⁹⁾の1500年分と等価となる載荷荷重および載荷回数を試験体に与えた。このことからロビンソン型床版は疲労耐久性が高いことが言える。しかしながら、過積載車両による想定外の荷重やコンクリート施工に起因した疲労損傷が今後発生しないとも限らない。ここに、著者らが本研究を行った理由がある。赤外線計測は非接触での計測が可能であり、結果を面で捉え可視化できる合理的な非破壊検査手法である。本研究では、ロビンソン型鋼・コンクリート合成床版の維持管理に活用するための有益な結果を示すことができたと考えられる。

今後の展望として、広範囲の床版面の計測を行う場合、膨大なデータ処理が必要となる。本計測手法を実用化するために合理的な処理方法の検討など必要と考えている。また、今後、輪荷重試験やそれに代わりうるスタッドの疲労試験を積み重ねていく予定であり、定量的で信頼性のある計測手法として成長させたいと考えている。

参考文献

- 1) 田崎忠行, 池田道政, 上田多門, 大山耕二, 川島一彦, 城處求行, 道家孝行, 西川和廣, 藤野陽三, 三木千壽, 宮川豊章: 道路橋の予防保全に向けた提言, 2008.5.
- 2) Sakagami, T.: Remote nondestructive evaluation technique using infrared thermography for fatigue cracks in steel bridges, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 38, Issue 7, pp. 755-779, 2015-7.
- 3) 中村繁貴, 高谷哲, 前田良文, 山本貴士, 宮川豊章: 赤外線サーモグラフィによるかぶりコンクリートのはく落予測手法, 土木学会論文集 E2, Vol. 69, No. 4, pp. 450-461, 2013.
- 4) 磯光男, 久保田和徳, 越後滋, 橘吉宏, 伴亨, 歌川紀之: 打音法による合成床版の非破壊検査手法, 第6回床版シンポジウム論文報告集, pp. 249-254, 2008.6.
- 5) 水野浩, 和泉遊以, 阪上隆英, 松井繁之, 杉山俊幸: 赤外線サーモグラフィを用いた鋼・コンクリート合成床版の非破壊検査手法に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 1161-1169, 2013.3.
- 6) 水野浩, 松井繁之, 大西弘志, 杉山俊幸, 街道浩: 床版取替用プレキャスト合成床版の合理化継手の疲労耐久性評価, 構造工学論文集, Vol. 58A, pp. 1112-1122, 2012.3.
- 7) 和泉遊以, 阪上隆英, 森直也, 久保司郎, 玉越隆史: 自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による実橋梁の疲労き裂検出～防食塗装膜および車両走行速度がき裂検出性に与える影響の検討～, 第65回土木学会年次学術講演会講演論文集, pp. 277-278, 2010.9.
- 8) 松井繁之, 文兌景, 福本嘸士: 鋼板・コンクリート合成床版中のスタッドの疲労破壊性状について, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 1303-1311, 1993.
- 9) 松井繁之: 道路橋床版, 森北出版, 2007.10.

(2015. 12. 1 受付)

STUDY OF FATIGUE DURABILITY INSPECTION AND EVALUATION FOR STEEL-CONCRETE COMPOSITE DECK BY INFRARED THERMOGRAPHY TECHNOLOGY

Hiroshi MIZUNO, Yui IZUMI, Kosuke NAKANO, Takahide SAKAGAMI and Shigeyuki MATSUI

In Japan, a lot of steel-plate concrete composite decks have been constructed instead of RC slabs. The composite decks were also required appropriate maintenance to keep high durability. The rational non-destructive inspection has been required to detect unfairable fatigue damage at welding parts. In the Robinson type composite deck, occurrence of fatigue deterioration of studs welded on bottom steel plate was one of the phenomenon which should be avoided. Therefore the authors have studied how to detect fatigue deterioration in the concrete. In this study, the authors tried to apply a performed infrared stress measurement by infrared thermography. Then from the data of the thermography method measured during wheel running fatigue test for a composite deck, the authors could find out a useful method to detect and to evaluate fatigue damage of the studs.