

## 論文・報告

# 赤外線サーモグラフィを用いた SC デッキの維持管理への適用検討

Application consideration for maintenance of steel-concrete composite deck by infrared thermography

水野 浩 \*1  
MIZUNO Hiroshi

尾上 紘司 \*2  
OGAMI Hiroshi

川原 桂史 \*3  
KAWAHARA Keiji

ロビンソン型鋼・コンクリート合成床版のSCデッキは、耐久性、施工の容易さなどから、少数主桁橋梁や細幅箱桁など 130 万 m<sup>2</sup> 施工されており、今後もその適用は増加するものと考えられる。一方、持続可能な社会資本整備を行うために、既存ストックを適切に維持管理し、有効活用する必要がある。

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。また、不測の損傷により床版内へ水が浸入した場合には、コンクリート床版などと同様に耐久性の低下につながる恐れがある。これらに着目し、赤外線サーモグラフィを用いて SC デッキの維持管理への適用について検討を行った。ここでは、それらの検討結果を示す。

キーワード：赤外線サーモグラフィ、非破壊検査、滞水、疲労耐久性

## 1. はじめに

スタッドジベルはロビンソン型合成床版である SC デッキの重要な要素であり、交通荷重の繰返し载荷による回転せん断<sup>1)</sup>による疲労損傷に注意が必要である。筆者らのこれまでの研究<sup>2)3)</sup>において、輪荷重走行試験で、赤外線サーモグラフィを用いてスタッド溶接部の損傷をとらえることができた(図 1)。より早期の検出を可能とするため、損傷が鋼板表面に現れる前の変化を、熱弾性応力計測により、室内疲労試験で確認を実施した。

防水層の損傷やコンクリート床版のひび割れなど、SC デッキの不測の損傷により床版内へ水が浸入した場合、鋼板の腐食やコンクリート床版のひび割れの進行など損傷が加速することが予測される。そのため、底鋼板表面に滞水させた試験体を用い、赤外線サーモグラフィによるアクティブ加熱法を用いた滞水検出を実施した。

ここでは、上記 2 つの SC デッキの維持管理に資する研究について検討結果を示す。なお本報告は、土木学会構造工学論文集 Vol.66A 掲載の論文<sup>4)5)</sup>を再構成したものである。

## 2. 室内疲労試験による合成床版スタッドにおける疲労亀裂の発生検出<sup>4)</sup>

### (1) 概要

底鋼板の下面まで貫通に至っていないき裂を早期検出

するために、実験室で合成床版のスタッドに作用するせん断力を再現した負荷を与える室内疲労試験を行った。疲労試験と並行して、赤外線サーモグラフィでスタッド溶接面裏側の鋼板表面に対して熱弾性応力測定を行うことで、貫通前のき裂が鋼板表面に及ぼす影響について確認した。

### (2) 試験体の概要

試験の概要を図 2, 3 に示す。試験体の材質は実際に合成床版で使用されている SS400 であり、鋼板にはスタッドが溶接されている。今回の試験に用いた試験体では、鋼板厚さは 9 mm、スタッドの直径は 16 mm とした。スタッドの高さは 60 mm である。

### (3) 試験方法

スタッド溶接部に初期き裂を導入した後、油圧式サー

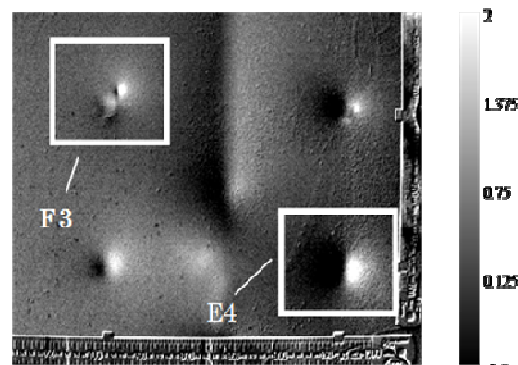


図 1 輪荷重走行試験での疲労亀裂の検出<sup>2)</sup>

\*1 川田工業㈱大阪技術部四国技術課 課長

\*2 川田工業㈱大阪技術部四国技術課 課員

\*3 川田工業㈱四国工場橋梁技術課 課長

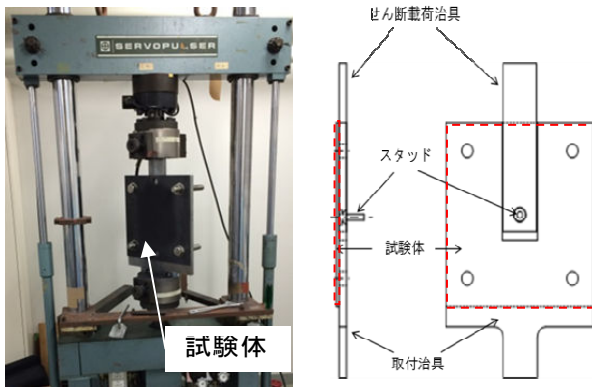


図 2 疲労試験機外観および概要図

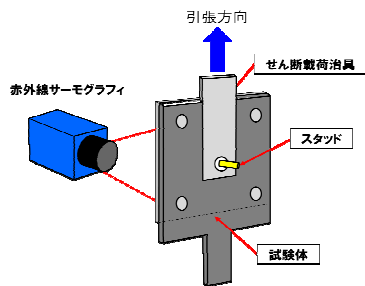


図 3 測定装置の設置概要図

疲労試験機を用いてスタッドに作用するせん断力を与えた。通常、合成床版のスタッドに作用するせん断応力は 50 MPa 以下となるように設計するため、実際に即した疲労試験となるよう、スタッドの断面に作用するせん断応力振幅を 50 MPa とした。25 mm レンズを装着した赤外線サーモグラフィ (SC7500 [FLIR 社], MCT アレイセンサ) を用いて、測定時間を 5 秒間、測定周波数を 157 Hz とし測定を実施した。

合成床版の底鋼板下面にあたる試験体に対して赤外線サーモグラフィで時系列赤外線強度画像を撮影した。得られたデータに対して自己相関ロックイン処理<sup>2)</sup>を行い、相対応力分布を取得した。

#### (4) 試験結果

試験体のスタッド溶接部周辺の相対応力分布の変化を図 4 に示す。暗色で示す相対応力値が低い部分には圧縮応力が、明色で示す相対応力値が高い部分には引張応力が作用していることを表している。図 4 (b) に示すようにスタッドにせん断力が作用すると、引張域である明色と圧縮域である暗色がスタッド中心付近を境に、対に分布する。なお、0 cycle は初期き裂導入後を示している。

図 4 より、繰返し回数の増加に伴って、相対応力値の低い暗色の部分が試験体幅方向に広がっている。2.0 × 10<sup>7</sup> cycles 時点でスタッド溶接部周辺に対して磁粉探傷試験を実施した。その結果を写真 1 に示す。初期き裂が試験体幅方向に進展している。

このき裂の形状と、相対応力分布上での暗色部の形状

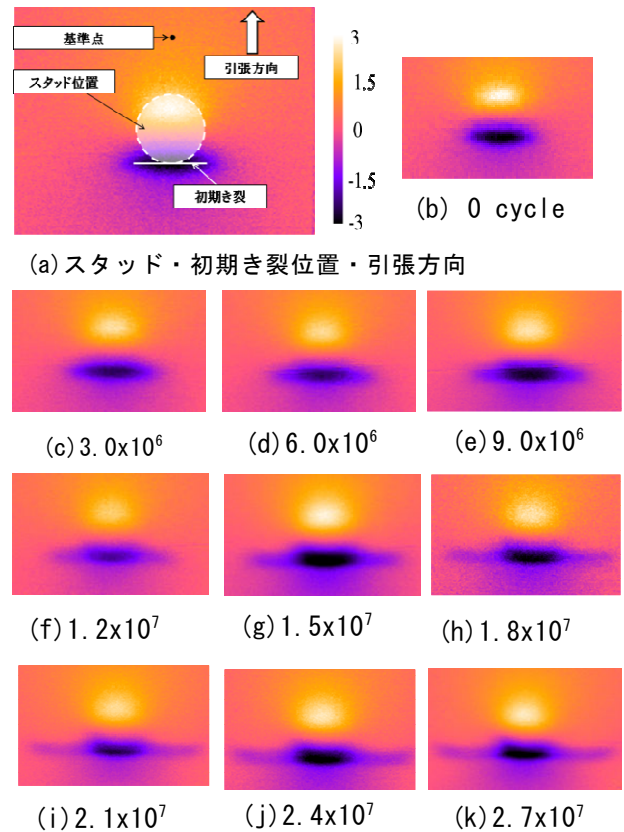


図 4 スタッド周辺の相対応力分布変化

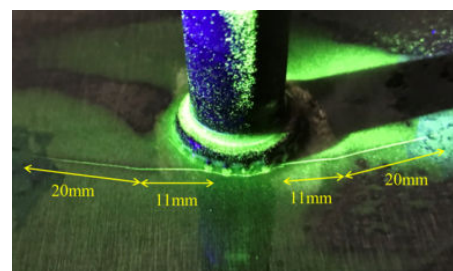


写真 1 磁粉探傷試験 (2.0 × 10<sup>7</sup> cycles 時)

は非常に酷似しており、相対応力分布上でき裂の進展をよく捉えている。

この相関性を定量的に検討するために、図 5 に示す試験体長手方向と試験体幅方向の線上の応力分布を求めた。図 6 に試験体幅方向の相対応力分布を示す。これは、図 5 中の青色の線上の分布図を示す。相対応力値 -0.5 程度の範囲が繰返し回数の増加に伴い、幅方向に広がっている。この広がりが暗色部の広がり、つまりき裂の進展を表している。また、暗色部中心付近の相対応力値は、繰返し回数の増加により大きくなっている。すなわち、き裂が板厚方向に進展し底鋼板下面部の応力が増加していることを意味している。これらの考察から、疲労き裂の進展を画像のみではなく、数値から定量的に評価できる知見を得た。

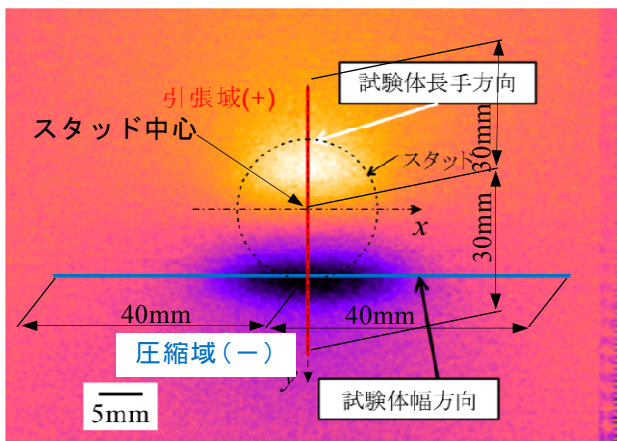


図5 相対応力分布抽出位置

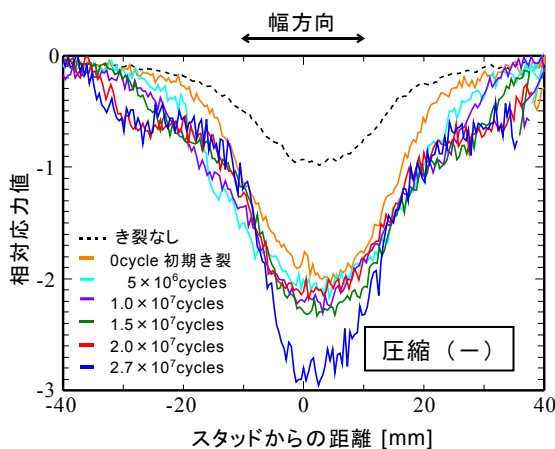


図6 試験体幅方向の相対応力分布

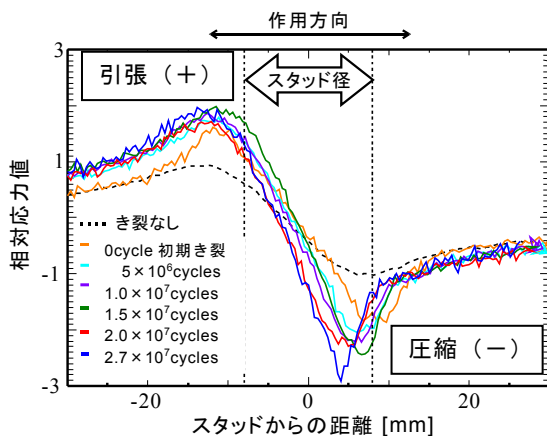


図7 試験体長手方向の相対応力分布

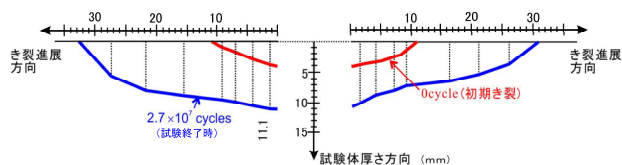


図8 き裂の深さおよび形状の変化

次に、試験体の長手方向の応力分布を図7に示す。これは図5中の赤色の線上の分布を示している。図7より、相対応力分布にはスタッドを境に引張応力および圧縮応力のピークが現れており、繰返し回数の増加に伴い圧縮応力のピーク位置がスタッド中心位置に近づいている。一方で、引張応力のピーク位置は繰返し回数に対してほとんど変化していない。これは、引張域にはき裂が生じていないため、応力状態が安定しているが、圧縮域では、き裂の進展に伴い応力状態が変化していることが表れている。すなわち、相対応力値のピーク位置の変動が観察できた場合は、き裂が発生している可能性が高く、き裂の発生時期を推測できると考えられる。実構造物では、軸重の異なる輪荷重が走行するため、ピーク値に着目するのではなく、ピークを示す位置がスタッド中心へ移動しているなど、分布形状の変化に着目する必要がある。長手方向の相対応力分布でも繰返し回数の増加により、圧縮の最大相対応力値は大きくなっている。図8に、試験開始時(0 cycle)および、試験終了時( $2.7 \times 10^7$  cycles)のき裂深さおよび形状(長さ)の変化を示す。本結果は、き裂深度計にて計測した結果である。初期き裂の深さは最大4 mm程度である。試験終了時は、試験体裏面を目視観察したところ貫通まで至っていない。き裂深度計の値が試験体厚9 mm以上の値を示している。これは、き裂がスタッド中心に向かって斜め方向に進展しており、き裂に沿った長さを計測していることに起因する。

室内疲労試験の結果から、疲労き裂の進展と赤外線サーモグラフィを用いて取得した相対応力分布や相対応力値の推移との高い相関性を確認できた。このことから、相対応力分布を継続的に取得することにより、疲労き裂発生の有無や進展の状況を評価可能であると考えられる。

### 3. 合成床版試験体を用いた滞水検出試験<sup>5)</sup>

#### (1) 実験方法

使用した試験体は、図9に示す底鋼板厚さ6 mmと8 mmの2種、コンクリート厚さ150 mm、平面寸法540 mm×540 mmの合成床版試験体である。試験体の鋼板とコンクリートの間には厚さ0.1 mm、0.3 mmおよび1.0 mmの空隙を設け、空隙部に水を注入して滞水状態にした。本実験では、水注入前後に、写真2に示すように、底鋼板下面より出力500 Wのハロゲン投光器4灯を用いてアクティブ加熱(図10)し、加熱終了後の冷却過程における底鋼板下面の温度分布の変化を、赤外線サーモグラフィにより計測した。

赤外線測定には、温度分解能0.025 KのIndigo社(現FLIR社)製赤外線カメラPhoenixを使用した。加熱時間は、10秒~300秒の間で検討し、本論文では欠陥部で比較的良好なコントラスト変化が見られた30秒および

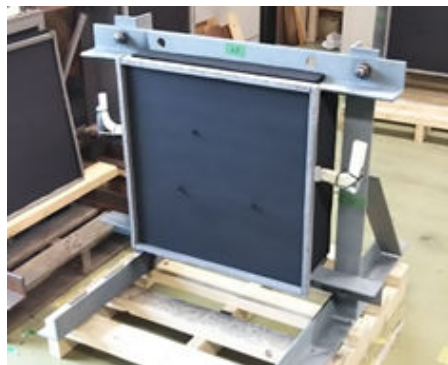
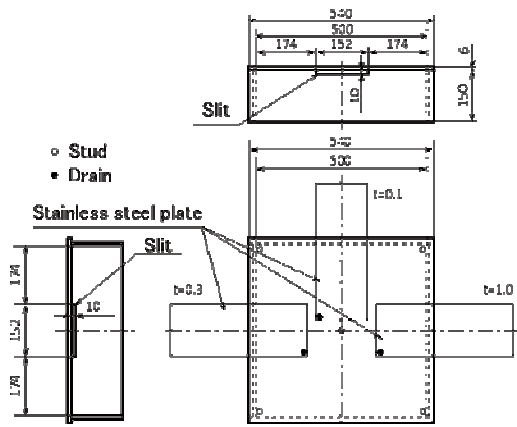
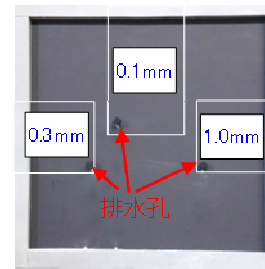
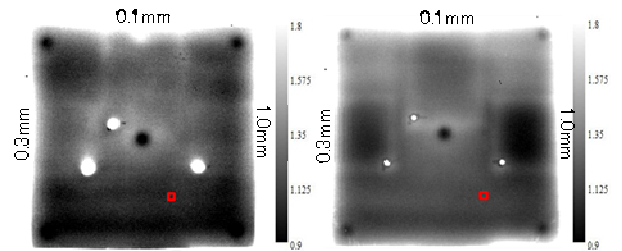


図9 滞水試験体概要

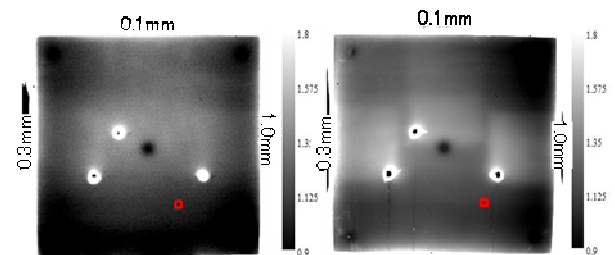


(a) 試験体の欠陥位置



(b) 滞水 (30 秒加熱)

(c) 空隙 (30 秒加熱)



(d) 滞水 (300 秒加熱)

(e) 空隙 (300 秒加熱)

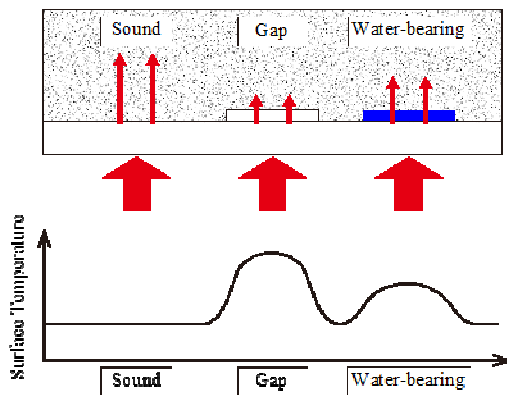


図10 アクティブ加熱法による滞水・空隙



写真2 アクティブ加熱状況

図11 6 mm 試験体計測結果 (ロックイン処理画像)

300 秒の 2 種類について比較・考察する。撮影速度は、計測機器の制約上処理可能枚数が限られているため、加熱時間に応じて変化させ、加熱時間 30 秒では 22.6 Hz、加熱時間 300 秒では 2.83 Hz とした。また、試験時の外気温および試験体の初期温度は、約 14 °C であった。

合成床版の鋼板下面の表面処理には、一般に C5 (フッ素樹脂系) 塗装、金属溶射、メッキ、耐候性鋼材が用いられる。既往研究において、合成床版のコンクリートと底鋼板間の空隙を検出する実験が実施され、メッキでは放射率が低いため欠陥検出が難しく、C5 (フッ素樹脂系) 塗装および金属溶射では欠陥検出が可能かつ疑似黒体可塗料と同程度の欠陥検出性を示す結果が得られている。本実験では、C5 (フッ素樹脂系) 塗装および金属溶射の場合を想定し、それらと同等の実験結果が得られた疑似黒体化塗料を鋼板表面に塗布した。なお、実際の構造物での試験では、疑似黒体化塗料は、メッキの場合は必要、C5 (フッ素樹脂系) 塗装および金属溶射では不要となると考えられる。

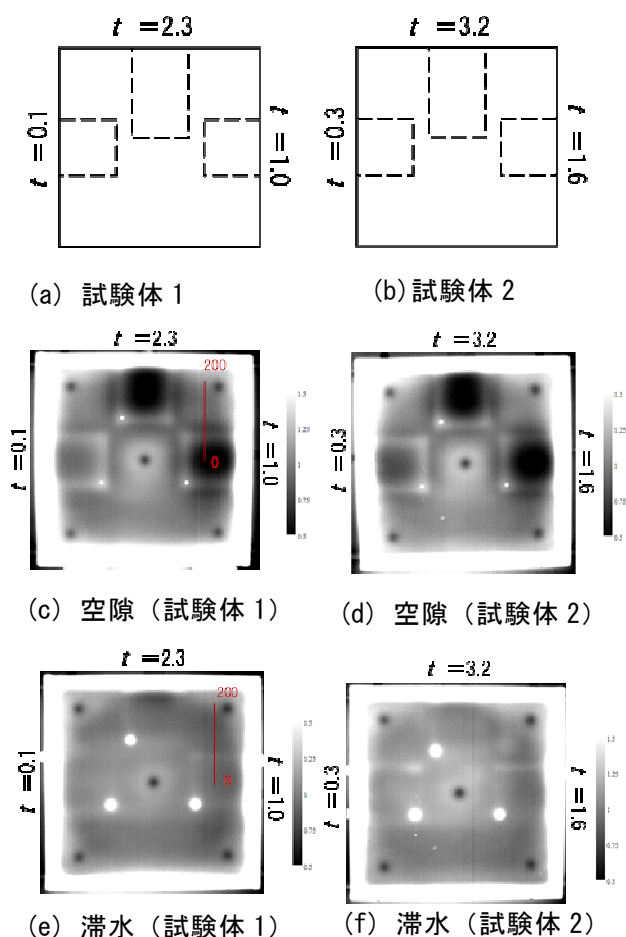


図 12 8 mm 試験体の計測結果  
(ロックイン処理画像)

(2) 実験結果

1) 6mm 試験体

時系列の赤外線データに対して、参照信号を健全部から取得し、加熱終了後 10 秒間の冷却過程に対して自己相関ロックイン処理を行った。ロックイン処理により得られる画像は、参照信号を取得した健全部(図 11 の赤い点の位置)に対する冷却速度の比の分布を表しており、冷却速度が大きい場合はロックイン値が大きくなり白色(1 より大きい)を示し、冷却速度が小さい場合はロックイン値が小さくなり黒色(1 より小さい)を示す。図 11 に滞水・空隙の状態における 30 秒加熱および 300 秒加熱の場合に得られた自己相関ロックイン画像を示す。図 11(a)には、試験体の欠陥位置と欠陥厚を表す概要図を示している。図 11(b)～(e)の各画像をみると、滞水部や空隙部で、健全部とは異なる濃淡が現れている。図 11(b)および(c)の 30 秒加熱の条件では、冷却速度の大きさを表すロックイン値は、滞水部では健全部より大きく(白色)、空隙部では健全部より小さい(黒色)。また、図 11(d)および(e)の 300 秒加熱の条件では、冷却速度の大きさを表すロックイン値は、滞水部・空隙部ともに

健全部より大きい(白色)。これらの結果から、画像のコントラスト(冷却速度)の違いから、空隙および滞水の検知・判別が行える可能性があると考えられる。

2) 8mm 試験体

鋼板厚  $t=8$  mm の試験体に対して、アクティブ加熱法による滞水・空隙の検出試験を行った。加熱終了後の 30 秒間の時系列の温度分布データに対して、自己相関ロックイン処理を行った。参照信号は健全部から取得した。得られた自己相関ロックイン結果を図 12 に示す。各試験体の欠陥部の位置と厚さは図 12(a)および(b)に示している。

図 12(c)および(d)より、空隙部で明確なコントラスト変化が生じている。また、図 12(e)および(f)より、滞水部では、欠陥のエッジ部で線上にロックイン値が高くなる様子が確認できた。このエッジ部での線上のコントラスト変化は、図 12(e)および(f)の空隙の結果や、鋼板厚 6mm の図 11(b)および(c)の結果にも現れている。鋼板厚 8mm の試験では、試験体のコンクリートの熱伝導率が低く、水に近い値であったこともあり、鋼板厚 6 mm の試験に比べて、滞水部での自己相関ロックイン値のコントラスト変化は不鮮明であった。しかしながら、滞水エッジ部のコントラスト変化から、鋼板厚 8mm の場合においても滞水の検出が可能である。

4. 結論

本研究の結果、以下の知見が得られた。

【室内疲労試験による合成床版スタッドにおける疲労亀裂の発生検出試験】

- (1) 室内疲労試験の結果から、今回の計測機器の場合、疲労き裂の進展状況は相対応力分布上に明瞭に現れ、可視的な相対応力分布のみではなく、相対応力値から定量的に確認することができた。
- (2) スタッドにせん断力が作用するとスタッド付近を境に引張応力と圧縮応力の領域が対をなして現れるが、き裂発生箇所では相対応力値のピーク位置が繰返し回数に伴いスタッド中心方向へ移動する。また、き裂位置での最大相対応力は、繰返し回数に伴って増加した。これらは、相対応力分布に現れるき裂進展の特徴と考えられる。

【合成床版試験体を用いた滞水検出試験】

- (3) 合成床版の鋼板厚 6 mm と 8 mm の場合において、空隙および滞水部で、自己相関ロックイン画像に明確なコントラスト変化が現れ、提案手法により両者の検出および判別が可能である。
- (4) 水や空気はコンクリートに比べて熱伝導率が低いいため、断熱効果により、加熱時には滞水部、空隙部は周囲の健全部に比べて温度が高くなる。しかし、加熱終了後の冷却過程では、空隙部や滞水部

で顕著の温度勾配が生じるため、結果として熱流束が大きくなり、温度変化が顕著に生じる。

## 5. おわりに

SC デッキに代表されるロビンソン型合成床版は今後も施工の増加が予想され、それにともない効率的な維持管理を行う必要がある。合成床版パネルの取換えのために、建設時にあらかじめ取換え時の本体補強を実施している路線もある。早期に損傷を検出することができれば、定期的にモニタリングし寿命予測を行うことも可能と考えられる。

今後は、さらに計測サンプル数を増やし、より定量的で信頼性のあるき裂進展予測や滞水検出が可能となるよう、その計測方法や評価方法を検討する必要がある。また、本計測手法を実用化するために、実橋での計測や、より広範囲の床版面を処理可能な合理的な手法、き裂付近にコンクリートの空隙や滞水が存在するといった複合的な損傷状態についても検討していく予定である。

## 参考文献

- 1) 松井繁之, 文兌景, 福本嘔士: 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, 土木学会, pp.1303-1311, 1993.
- 2) 水野浩, 和泉遊以, 中野好祐, 阪上隆英, 松井繁之: 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, 土木学会論文集 A1, Vol.72, No.2, 土木学会, pp.338-349, 2016.
- 3) 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.
- 4) 水野浩, 尾上紘司, 山下雄大, 塩澤大輝, 和泉遊以, 阪上隆英, 松井繁之: 赤外線サーモグラフィによるロビンソン型鋼・コンクリート合成床版のスタッド溶接部疲労損傷発生と進展の検出, 構造工学論文集, Vol.66A, pp. 895-903, 2020.
- 5) 和泉遊以, 水野浩, 市橋良, 関大志, 阪上隆英, 松井繁之: 赤外線サーモグラフィを用いた鋼・コンクリート床版の滞水検出, 構造工学論文集, Vol. 66A, pp.904-913, 2020.