

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滞水検出

滋賀県立大学 学生会員 ○市橋 良 滋賀県立大学 正会員 和泉遊以
川田工業株式会社 正会員 水野 浩 神戸大学 正会員 阪上隆英
大阪大学名誉教授 名誉会員 松井繁之

1. 目的

ロビンソン型鋼・コンクリート合成床版（以下、合成床版と略す）は、鋼板とコンクリートを鋼板に溶接したスタッドにより一体化した疲労耐久性の優れた床版形式であり、橋梁の新設や床版取替えに数多く用いられている。合成床版は、床版下面からコンクリート内部の状態を目視で確認することができず、これらを適切に維持管理するための効率的・合理的な非破壊検査手法の開発が求められている。文献⁽¹⁾では、赤外線サーモグラフィを用いたアクティブ加熱法により、合成床版のコンクリート充填性を評価する方法を提案し、その有用性を明らかにした。本報では、合成床版の防水層が破損し、コンクリート面から雨水が浸入した場合の底鋼板とコンクリート間の滞水を、アクティブ加熱法により検出する方法を提案し、その有効性について検討した結果を示す。

2. 計測方法および温度画像の高精度化

(1) 底鋼板直下から欠陥部を含む領域を均一にアクティブ加熱した場合、内部の空気とコンクリートの熱伝導特性の違いにより、健全部と欠陥部の底鋼板下面の温度に違いが生じる⁽¹⁾。本研究では、アクティブ加熱法を用いて、滞水部と健全部の温度差を赤外線サーモグラフィを用いて計測することにより、合成床版の滞水検出を試みる。

(2) 滞水部と健全部に現れる温度差は微小となることが予測されたため、自己相関ロックイン処理法⁽²⁾を用いて温度画像の高精度化を行う。自己相関ロックイン処理法は、赤外線計測画像内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、全領域の温度変動データとロックイン処理を行い、参照信号とした温度変動を基準とする温度変動の相対割合の分布を得る。これにより、ノイズ改善された高精度な画像を抽出することができる。本研究では、参照信号を健全部から取得し、加熱終了後の冷却過程に対してロックイン処理を行い、健全部に対する冷却速度の比を画像化した。

3. 実験方法

使用した試験体は、図1に示す底鋼板厚さ 6mm、コンクリート厚さ 150mm、平面寸法 540mm×540mm 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厚さ 0.1mm、0.3mm および 1.0mm の空隙を設け、空隙部に水を注入して滞水状態にした。水注入前後に、底鋼板下面より出力 500W のハロゲン投光器 4 灯を用いて加熱し、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℃ の Indigo 社製赤外線カメラ Phoenix を使用し、撮影速度は 30 秒加熱の場合は 22.6Hz、300 秒加熱の場合は 2.8Hz とした。

4. 実験結果

図2(a)に示すように、空隙部の欠陥厚さ 0.1mm、滞水部の欠陥厚さ 0.3mm、1.0mm の条件で試験を実施した結果について述べる。加熱時間は 30 秒および 300 秒とした。参照信号は健全部から取得し、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い、健全部との冷却速度の比を画像化した。画像は、冷却速度が大きい場合はロックイン値が大きくなるため白色を示し、冷却速度が小さい場合はロックイン値が小さくなるため黒色を示す。

図2(b)および図2(c)に、加熱時間 30 秒および 300 秒における自己相関ロックイン画像をそれぞれ示す。図2(b)より 30 秒加熱における冷却速度は、滞水部では健全部より大きく、空隙部では健全部より小さいことがわかる。また、図2(c)より 300 秒加熱における冷却速度は、滞水部・空隙部ともに健全部より大きいことがわかる。これらの結果から、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ことがわかった。一般に、水や空気はコンクリートよりも熱伝導率が小さい。したがって、欠陥の断熱性のみを考えた場合には、滞水部や空隙部では健全部よりも温度変化が生じにくくなると考えられる。しかし、本実験では主に滞水部・空隙部の方が

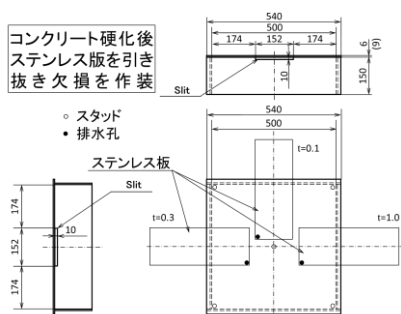
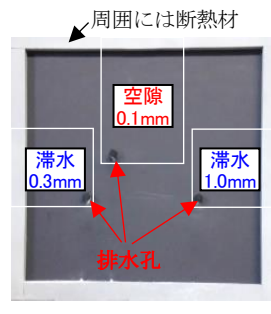
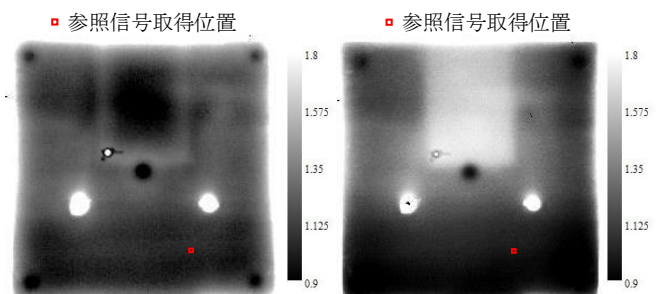


図1 試験体概要図 (mm)



(a) 各欠陥の概要



(b) 30 秒加熱の場合

(c) 300 秒加熱の場合

図2 自己相関ロックイン結果

キーワード 赤外線サーモグラフィ, 非破壊検査, 自己相関ロックイン法, 合成床版, 滞水
連絡先 〒522-8533 滋賀県彦根市八坂町 2500 滋賀県立大学 TEL 0749-28-8200

健全部よりも冷却速度が大きくなった。そこで、合成床版における伝熱メカニズムを明らかにするため、有限要素法による数値解析を行った。

5. 有限要素解析による伝熱メカニズムの解明

合成床版試験体を模擬した有限要素法による非定常熱伝導解析(NX Nastran)を行った。解析モデルは、図3に示す2次元の1/2 対称モデルである。試験体の初期温度を20°Cとし、底鋼板とコンクリートの間に幅75mm、厚さ t の空気層および滞水層を欠陥部として配置した。鋼板表面は周囲温度20°C、熱伝達率5W/m²/Kの自然対流境界とした。解析に用いた熱物性値を表1に示す。鋼板表面に2650W/m²の熱流束を与え、加熱中および加熱終了後の冷却過程の温度変化を調べた。

本稿では一例として、欠陥層厚さ $t=0.3\text{mm}$ 、加熱時間 $T=30\text{s}$ および $T=300\text{s}$ の解析結果を示す。健全部($x=86\text{mm}$ 、温度取得点A)および欠陥部($x=250\text{mm}$ 、温度取得点B)における鋼板表面温度の時間変化を図4(a)に示す。図2の自己相関ロックイン画像は、鋼板表面の冷却速度の比を画像化している。そこで、冷却過程の鋼板表面の温度変化を時間微分して冷却速度の変化傾向を求めた。結果を図4(b)に示す。図2および図4(b)より、実験と解析で得られた冷却速度の傾向(健全部に比べて滞水部は加熱時間によらず大きく、空隙部は30秒加熱の場合健全部より小さく、300秒加熱の場合は大きい)は一致しており、実験結果の妥当性を確認できた。次に、冷却過程の伝熱メカニズムについて考察する。冷却過程では、主に材料内部に生じた温度勾配で熱の流れが決まる。そこで、加熱終了後の冷却過程における、欠陥内部の温度勾配と熱流束を調べた。温度勾配は、図3の $x=250\text{mm}$ における鋼板と欠陥の境界(温度取得点C)と、欠陥とコンクリートの境界(温度取得点D)の温度差として評価した。また、熱流束 q は次式で示すフーリエの法則に基づいて算出した。 k は熱伝導率、 $\partial T/\partial y$ は面外方向の温度勾配である。

$$q = -k \frac{\partial T}{\partial y} \quad (1)$$

ここで算出される熱流束は、鋼板から欠陥またはコンクリート側に流れる熱量に相当する。加熱後の冷却過程における欠陥部と健全部の温度勾配および熱流束の時間変化を、図4(c)および(d)にそれぞれ示す。これらの結果から、冷却過程の温度変化の傾向を考察する。滞水部は、表1に示す通り健全部(コンクリート)に比べて熱伝導率は低いが、図4(c)より温度勾配が健全部よりも大きいため、図4(d)のように熱流束が健全部よりも大きくなり、健全部に比べて冷却速度が大きくなったと考えられる。一方、空隙部は、表1に示す通り健全部に比べて熱伝導率が極めて小さく、また図4(a)および(c)より加熱時間が長くなると鋼板の表面温度(30秒加熱直後:23.5°C、300秒加熱直後:41°C)や内部の温度勾配(差)(30秒加熱直後:3°C、300秒加熱直後:14°C)が急激に大きくなっている。このことから、短時間加熱では空隙部の断熱性すなわち熱伝導率の影響により健全部に比べて空隙部の冷却速度が小さくなり、長時間加熱では鋼板表面の外気への熱伝達および材料内部への熱伝導の影響により健全部に比べて空隙部の冷却速度が大きくなったと考えられる。

6. まとめ

アクティブ加熱法による合成床版の滞水検出の有効性・妥当性を、実験および数値解析により明らかにした。今後、底鋼板板厚の影響および高精度に滞水検知を行うための加熱条件やデータ処理条件について検討し、本検査法の実用化を目指す。

参考文献 (1) 水野浩ほか、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, 土木学会, pp.1161-1169, 2013年3月 (2) 阪上隆英ほか、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による疲労き裂の遠隔非破壊検査技術の開発(第1報 溶接試験片を用いた基礎的検討)、日本機械学会論文集(A), Vol.72, No.724, pp.1860-1867, 2006

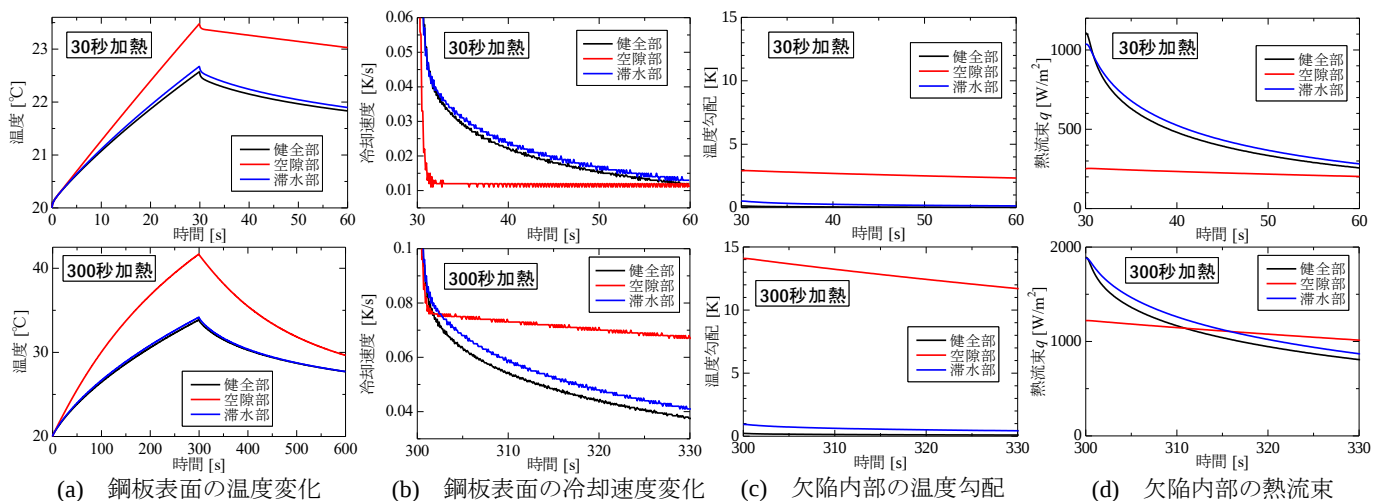


図4 FEMによる熱伝導解析結果