赤外線サーモグラフィを用いた合成床版の 非破壊検査手法に関する研究

Study on Nondestructive Testing for Steel-concrete Composite Slab by Infrared Thermography Technology

水野 浩 * ¹	満口 勝 ^{*2}	盛 伸作* ³
Hiroshi MIZUNO	Masaru MIZOKUCHI	Sinsaku MORI
長谷川 孝一* ⁴ Koichi HASEGAWA	栗田 学 ^{∗5} Manabu KURITA	

合成床版の一種であるSCデッキは、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 耐久性の高い床版である一方, RC 床版や PC 床版などのコンクリート系床版と異なり床版下面からはコンク リート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の合理的な非破壊検査手法を確立する必要がある。また、建設時においては狭隘部など のコンクリートの充填性を確認することは、品質の高い合成床版を建設する上でも重要な課題である。

本研究では、検査結果の可視化が可能、また検査結果を面で捉えることが可能な赤外線サーモグラフィに着 目し、合成床版の建設時および維持管理時に、健全性の評価を行うため有効な非破壊検査手法として活用する ことを目的とする。

キーワード:SC デッキ,赤外線サーモグラフィ,非破壊検査,疲労耐久性

1. はじめに

合成床版の一種であるSCデッキは、輪荷重走行実験 などで疲労耐久性が高いことが証明された床版形式 1)で あり,LCC に配慮し新設橋梁や床版取替え工事などで適用 されてきている。

SCデッキは、図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 あるが, RC 床版や PC 床版と異なり, 床版下面からはコン クリート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の合理的な非破壊検査手法を確立 する必要がある。また,建設時においては狭隘部のコン クリートの充填性を確認することは、品質の高い合成床 版を建設する上でも重要な課題である。

本研究では、検査結果の可視化が可能、また検査結果 を面で捉えることが可能な赤外線サーモグラフィに着目 し、SCデッキの建設時および維持管理時、健全性の評 価を行うため有効な非破壊検査手法として活用すること を目的とする。

(1) SCデッキの概要

本研究では、図1に示すSCデッキ(ロビンソン型合 成床版)に着目し検討を行う。SCデッキは板厚 8~9mm の底鋼板とコンクリートがスタッドジベルで結合されて おり,このスタッドジベルがSCデッキの疲労耐久性に 大きく影響する。また、コンクリート打設時の補剛のた め横リブが設置されており、主桁上のハンチ部ではこの 横リブを連結するアングルと鋼板が鋭角で交差する狭隘 部分が生じ、該当箇所のコンクリートの充填性が低下す る可能性があり未充填部分を無くす必要がある。

(2) 赤外線計測の概要

赤外線サーモグラフィは、物体の表面から放出される 赤外線エネルギー分布を赤外線センサにより測定し、こ



*4 川田工業㈱北陸事業部富山工場生産技術課 *5 川田工業㈱鋼構造事業部営業統括部橋梁営業部大阪営業課 係長

^{*1} 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部技術部大阪技術課 主幹

^{*2} 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部工事部東京工事課 係長

^{*3} 川田工業㈱鋼構造事業部技術統括部工事部東京工事課 工事長



図2赤外線サーモグラフィを用いた充填性評価



図3 熱弾性応力測定の概念図

れを温度分布に換算・画像化して表示する装置である。 近年,赤外線センサおよびセンサからの出力信号処理技 術の進歩により,温度計測分解能,精度および空間分解 能に優れ,温度変動の過渡的現象を高速に計測できるサ ーモグラフィが開発されてきた。

コンクリートの充填性評価には、図2(a)に示すパッシ ブ法、および図2(b)に示すアクティブ法を用いる。生コ ンクリートと鋼板に温度差がある場合、打設時にコンク リートと鋼板の間で熱の移動が生じる。このとき、コン クリートが充填されている部分と、コンクリートが未充 填あるいは充填が不完全な部分では鋼板表面温度に違い が現れると考えられる。パッシブ法では、この温度の違 いを赤外線サーモグラフィで計測することにより、コン クリートの充填性を評価する。アクティブ法においては、 図2(b)に示したように、底鋼板直下から未充填箇所を含 む領域を均一に加熱した場合、空隙部における断熱性の 影響により、健全部と空隙部における底鋼板下面の温度 に違いが生じる。この温度差を赤外線サーモグラフィに より検出することにより、コンクリート硬化前・後にコ ンクリートの充填性が評価できる。

さらに、図3に示すように赤外線サーモグラフィによる温度場計測を用いることにより、物体に働く応力分布

の変化を計測することが可能になる。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Δσと温度 変化ΔTとの間には,次式で示す関係が成立する。

$\Delta T = -K_m \cdot T \cdot \Delta \sigma \quad (\not \exists 1.1)$

ここで Δ T は温度変化量,Km は熱弾性係数,T は絶対温 度, Δ σ 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 Δ T を測定する ことで,主応力和の変化量 Δ σ の分布を得ることができ る。これを供用下にあるSCデッキ中のスタッドの溶接 部における疲労損傷の検出に適用できる。

2. 模擬欠陥を用いた充填確認実験

(1) 実験概要

a) 試験体の概要

充填確認実験では,図4に示す欠陥寸法の検出限界を 確認する目的の簡易試験体(試験体A),および実際のS Cデッキの構造を模擬し,ハンチ部,スタッドなどを再 現した試験体(試験体 B)を用いる。試験体 B は,図5 に示すように健全部と模擬欠陥部の比較を行った。

(2) 実験結果

a) 欠陥部の寸法に着目した実験結果

試験体 A のコンクリート打設中の鋼板下面の温度分布 を、赤外線サーモグラフィを用いてパッシブ法、アクテ ィブ法で計測することにより、鋼板直上のコンクリート 未充填部の検出実験を行った。コンクリート打設中にお ける鋼板下面の時系列温度分布画像を図 6 に示す。図中 の計測結果で、白色となっている部分が黒色部分より高 温となっていることを示す。

模擬欠陥として設置した発泡スチロール片およびジャ ンカブロック部では、周囲よりも温度が低い領域として 計測されており、鋼板下面から欠陥部の形状を認識する ことが可能である。また 20mm×20mmの発泡スチロール片 の設置箇所では、周囲の健全部との間に温度差が現れて いるが、10mm×10mmの発泡スチロール設置箇所では、特 徴的な温度変化は現れなかった。図7の温度画像は、加 熱後から加熱前を差引いた温度差の分布を示している。 図中の明るい部分は温度差が大きく断熱状態にあること を示している。欠陥部において、周囲の健全部よりも高 い温度が計測されていることがわかる。この欠陥部にお ける高温部は、欠陥による断熱効果により、面外方向の 鋼板からコンクリートへの熱移動が妨げられたために生 じたものである。

b)実構造を模した試験体 B の欠陥部の検出

健全試験体および模擬欠陥試験体を用いたコンクリート打設時の温度計測結果を,図8および図9にそれぞれ示す。今回の計測では,鋼板より生コンクリートの温度





図4 試験体Aの概要



図5 試験体Bの概要



図7 アクティブ加熱法による温度差分画像





(a) 計測開始 16 秒後







図8 打設中の温度分布計測結果(模擬欠陥試験体)





(a) 健全試験体



(b) 模擬欠陥試験体(発泡スチロール)図10 アクティブ加熱計測結果

が高温であり、コンクリートが接した部分が高温を示す 白色となっている。図 8,9 の温度画像より、コンクリー トの流動の様子が温度分布の変化として現れていること がわかる。

健全試験体および模擬欠陥試験体に対して灯油燃焼ヒ ーターによる1分間のアクティブ加熱を行い,加熱中・ 加熱後の底鋼板下面の温度分布変化を赤外線カメラによ り計測した。健全試験体と模擬欠陥試験体の結果を,そ れぞれ図10(a),(b)に示す。画像は加熱直後の温度分布 から加熱前の温度分布を引いた温度差分画像を示してい る。図10(b)より,ハンチ部および水平部の模擬欠陥部に おいて局所的な温度変化が現れており,これに基づき未 充填部の検出が可能であることが検証できた。

3. スタッドの疲労損傷評価

SCデッキは,図11に示すように輪荷重の繰返し載荷 によりスタッドが回転せん断力を受け,一定方向せん断 力に比較して早期に疲労破断することが明らかになって いる³⁾。しかしながら,供用中の合成床版のスタッド疲 労損傷を非破壊的に検出・評価する手法は未だ確立され ていない。ここでは,赤外線応力測定法に基づき,供用 中合成床版のスタッド疲労損傷を検出・評価する方法に ついて検討する。

(1) 赤外線応力測定法とその高精度化技術

赤外線応力測定によれば、動的荷重下の応力変動に伴



図11 スタッドに作用する回転せん断力 と亀裂破面





2900



(c) 断面図 図 12 合成床版試験体の概要





1.5

1.125

0.75

0.375

1.5

1.25

1

0.75



(b) 計測エリア2 図14 載荷回数85万回(載荷荷重85kN)

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。 しかしながら,赤外線応力測定により得られる温度変動 は微小であり,応力変動による温度変動は計測ノイズと 同程度となる場合がある。赤外線応力測定の高度化技術 の1つとして,赤外線計測データと応力変動に関する参 照信号とのロックイン相関処理を行うことにより S/N 比 を改善する手法がある。自己相関ロックイン法²⁾では, 赤外線計測画像内の一部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を用 いることなく,任意荷重の下での相対応力分布を高精度 に求めることができる。

(2) 実験方法

図12に示す試験体を用いて,輪荷重走行試験機による 疲労実験を実施した。本試験体は,床板取替えに用いる プレキャストSCデッキの実物大試験体⁴⁾である。試験 体の底鋼板厚さは8mm,スタッド直径は16mm,コンクリ ート厚は152mmである。実験は図13に示すように,支 持桁の鉛直変位を拘束した状態での輪荷重走行実験(試 験I),および支持桁中央にトルクアップジャッキを設 置し負曲げモーメントを同時に載荷した輪荷重走行実験 (試験II)の2種類を行った。疲労実験中に定期的に赤 外線計測を実施し,底鋼板下面の応力分布の変化を観察



図 15 載荷回数 205 万回 (載荷荷重 270kN)

した。赤外線応力測定には、温度分解能 0.025℃の Titanium530Lを用いた。繰返し載荷による測定面の応力 変動に伴う温度変動を、撮影速度 157 Hz で 2 000 フレー ムの赤外線画像として計測した。

(3) 実験結果

載荷回数 85 万回 (載荷荷重 85kN) および 205 万回 (載荷回数 270kN) における計測結果を,図 14 および図 15 にそれぞれ示す。計測エリアは図 12(a)に示したとおりである。図 14 に示した載荷回数 85 万回では、計測視野に存在する7つのスタッドの内、1つのスタッドにおいて、水平せん断力により底鋼板に局所曲げが生じ、スタッド近傍に圧縮応力と引張応力が表れる特徴的な応力分布が計測されている。また、図 15 に示した載荷回数 205 万回では、視野内に収まっている全てのスタッドにおいて、同様の特徴的な応力分布がみられる。時系列に連続撮影された赤外線データより、スタッドに作用するせん断力が回転することが確認された。

底鋼板下面のスタッド周辺で生じる応力分布挙動について詳細に図16に示す。計測エリア2の右下のスタッドに注目し、輪荷重載荷時の応力分布変化に伴う温度分布の変化を観察した。図には、温度変動波形を併せて示している。スタッド中央部を境に温度(応力)の反転がみられ、またそれは時間の経過とともに回転しているよう





にみられた。この応力分布の挙動は,輪荷重載荷により スタッドに対してせん断力が作用し,また輪荷重の移動 に従ってせん断力の方向が変化した結果であり,既往の 研究結果³⁾と一致する。本手法により,スタッド周辺で 発生する応力分布の可視化が可能であること,またそれ に基づき応力の定量評価が可能であることが示された。 本手法で疲労実験中に測定を続けることによって,スタ ッドの疲労度進展も評価可能であると判断でき,継続し て計測する予定である。

4. まとめ

本研究の結果,以下の知見が得られた。 [充填確認計測について]

- 1)欠陥寸法に着目した試験体Aにおいて、面内の熱拡散 により、検出限界寸法は底鋼版の板厚に依存し、底鋼 版の板厚t=8mm、発泡スチロールを用いた厚さ20mm の模擬欠陥での検出限界寸法は、底鋼版板厚の倍程度 の20mm×20mm程度であり、骨材と同程度の寸法まで検 出できることが分かった。
- 2)実構造を模した試験体Bの欠陥部の検出実験について、 温度分布、および温度変動波形より、パッシブ法、ア クティブ法の両方においてSCデッキのコンクリート の充填性を十分評価できることが分かった。これらを 併用することで、より精度よく欠陥部を検出すること が可能となると考えられる。

[スタッドの疲労損傷検出実験について]

3)赤外線応力測定法により、スタッド周辺の応力分布の 可視化が可能であり、それに基づきスタッドの損傷進 展を定量的に評価できることを示唆するものと考えられる。

5. おわりに

本研究では、SCデッキを模擬した試験体を使用し、 赤外線サーモグラフィを用いたコンクリートの充填性評 価手法、およびスタッドの疲労損傷評価について検討を 行った。その結果、建設時、および維持管理時の非破壊 検査手法として、赤外線サーモグラフィが有効であるこ とが確認できた。今後、充填確認計測では、健全部と欠 陥部の温度波形の差異などから欠陥部を定量的に検出す る手法について検討を行っていく。また、スタッドの疲 労損傷評価では、疲労破壊までの過程について赤外線応 力計測を行うことで、その関係を明確にすることを課題 と考え検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1)国土交通省土木研究所、(財)土木研究センター、民間企業21社17グループ:道路協床版の輪荷重走行実験における疲労耐久性評価手法の開発に関する共同研究報告書(その5)ー評価編-
- 2)阪上隆英,和泉遊以,久保司郎:赤外線サーモグラフィによる橋梁の非破壊試験技術,非破壊検査, pp. 309-314,2011.6.
- 3)松井繁之,文兌景,福本琇士:鋼板・コンクリートS Cデッキ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.
- 4)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,土木学会, pp.1112-1122,2012.3.