

# 自己関連ロックイン赤外線サーモグラフィ法に基づく 鋼・コンクリート合成床版におけるスタッドの疲労亀裂検出

Detection for fatigue crack of studs in steel plate-concrete composite deck based on self-reference lock-in thermography method

神戸大学 学生員 中野好祐 (Kosuke Nakano)  
神戸大学 正会員 阪上隆英 (Takahide Sakagami)  
災害科学研究所 正会員 三田村浩 (Hiroshi Mitamura)  
寒地土木研究所 正会員 表真也 (Shinya Omote)  
川田工業株式会社 正会員 栗田学 (Manabu Kurita)

滋賀県立大学 正会員 和泉遊以 (Yui Izumi)  
大阪工業大学 フェロー 松井繁之 (Shigeyuki Matsui)  
寒地土木研究所 正会員 岡田慎哉 (Shinya Okada)  
川田工業株式会社 正会員 水野浩 (Hiroshi Mizuno)  
川田工業株式会社 正会員 街道浩 (Hiroshi Kaido)

## 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る）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合成した高耐久性床版である。松井・文らの研究<sup>(1)</sup>より、輪荷重の繰返し载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されている。しかし、供用中の合成床版のスタッドの挙動および損傷状況を非破壊的に評価する手法はいまだに確立されていない。和泉らの先行研究<sup>(2)</sup>において、スタッドの回転せん断により生じる底鋼板下面の特徴的な応力分布を、赤外線応力測定法により可視化することが可能であり、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ている。

本研究では、合成床版を用いた輪荷重走行試験中に自己関連ロックイン赤外線サーモグラフィ法による高精度応力計測を実施し、得られた応力分布結果からスタッドの疲労亀裂を検出する手法について検討する。

## 2. 自己関連ロックイン赤外線サーモグラフィ法

### (1) 赤外線応力測定法

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、主応力の変化  $\Delta\sigma$  と温度変化  $\Delta T$  との間には、次式で示す関係が成立する。

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

ここで  $\Delta T$  は温度変化量、 $K_m$  は熱弾性係数、 $T$  は絶対温度、 $\Delta\sigma$  は主応力の変化量である。よって、赤外線サーモグラフィを用いて温度変化量  $\Delta T$  を測定することにより、主応力の変化量  $\Delta\sigma$  の分布を得ることができる。

### (2) 自己関連ロックイン処理法

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。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 比を改善する必要がある。自己関連ロックイン処理法では、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、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。

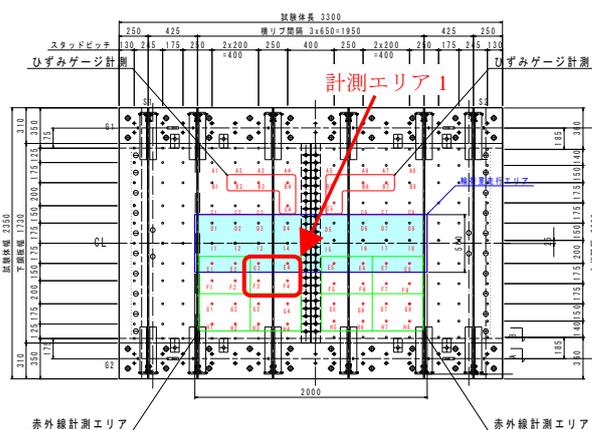


図1 合成床版試験体の概要



図2 荷重回数と荷重荷重の関係

## 3. 実験方法および結果

図1に示す合成床版試験体を用いて、輪荷重走行試験機による疲労試験を実施した。試験体の底鋼板の厚さは8mm、スタッドは $\phi 16 \times 110 \text{mm}$ 、合成床版厚は160mm（底鋼板8mm含む）であり、荷重荷重は図2に示すように階段状に変化させた。疲労試験中、定期的に赤外線応力計測を実施し、スタッド疲労損傷の発生・進展に伴う底鋼板下面の応力分布の変化を観察した。赤外線計測時の荷重は、比較のため様々に変化させた。赤外線応力測定には、温度分解能  $0.025^\circ\text{C}$  の FLIR 社製赤外線カメラ SC7530 を使用した。繰返し载荷による測定面の応力変動に伴う温度変動を、撮影速度  $157 \text{Hz}$  で 2355 フレーム（15秒間）の赤外線画像として計測した。

図1に示した計測エリア1において、荷重荷重を206kNとした場合の、荷重回数10万回および217万回における赤外線画像を図3(a)および(b)にそれぞれ示す。図3(a)に示した荷重回数10万回において、視野内に存在するすべてのスタッドにおいて回転せん断による特徴的な応力分布が計測されている。これに対して図3(b)の

載荷回数 217 万回では、健全状態でみられる回転せん断による応力分布形がくずれ、亀裂による特徴的な分布形が表れている。

次に、得られた 200 フレーム分の時系列赤外線データに対して自己相関ロックイン処理を施すことにより、画像のノイズ改善を行った。結果を図 4 に示す。自己相関ロックイン処理に用いる参照信号は、図中に示す位置から取得しており、図のコントラストは参照信号取得点に対する相対的な応力分布を示している。ノイズ改善前の赤外線画像を示した図 3(a)および(b)とノイズ改善後の自己相関ロックイン画像を示した図 4(a)および(b)を比較すると、ノイズ改善後の方が応力集中の様子がより鮮明に現れていることが分かる。さらに、図 3(b)の赤外線画像では確認することができなかった右上スタッドの局部応力集中が、図 4(b)の自己相関ロックイン画像においては明確に現れている。また本計測では、本稿で記載した計測箇所以外についても、同様の応力分布測定を行っており、検知した局部応力集中箇所と、別途実施した磁粉探傷試験により確認した底鋼板下面の亀裂の位置が概ね一致していることを確認している。本手法により、合成床版のスタッド近傍で生じる亀裂の検出が可能であることが示された。

次に載荷荷重の大きさを変えた実験を実施し、本手法の亀裂検出限界について調べる。載荷回数 217 万回時における載荷荷重を 100kN とした場合の赤外線画像および自己相関ロックイン画像を、図 5(a)および(b)にそれぞれ示す。図 5(b)より、載荷荷重 100kN の場合においても亀裂による応力集中が鮮明に現れており、亀裂の検出が可能であることが示された。また荷重が小さい場合において、自己相関ロックイン法によるノイズ改善がスタッドの亀裂検出に極めて有効であることが示された。

#### 4. まとめ

本研究では、ロビンソン型合成床版を用いた輪荷重走行試験中に赤外線応力測定を実施し、本手法によるスタッドの疲労亀裂の検出に関する検討を行った。その結果、自己相関ロックイン赤外線サーモグラフィ法による高精

度な応力分布計測法を適用することにより、遠隔・非接触でスタッドの疲労亀裂の検出が可能であることが明らかになった。さらに、載荷荷重が小さい場合においても、本ノイズ改善処理法が亀裂検出に関して有用であることが明らかになり、合成床版の供用時における健全性評価への本手法の実用性が示された。今後は、本手法に基づいて合成床版の健全性を定量的に評価する手法について検討する。

- 参考文献** (1) 松井繁之, 文兌景, 福本昉士, 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) 和泉遊以, 阪上隆英, 水野浩, 松井繁之, 大西弘志, 街道浩, 赤外線応力計測に基づく鋼・コンクリート合成床版におけるスタッドの疲労損傷評価, 第 67 回土木学会年次学術講演会講演論文集, 土木学会, I-597, 2012

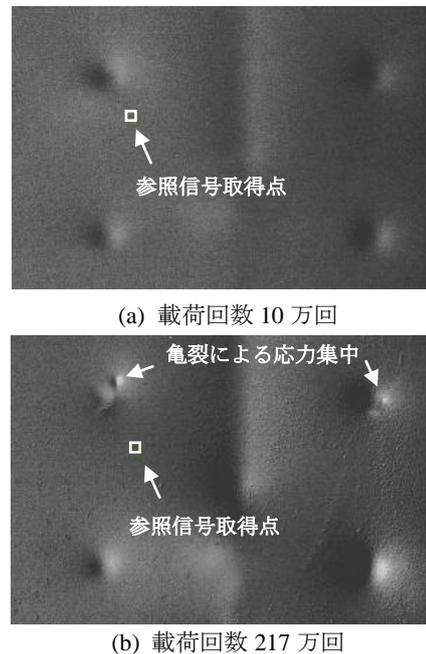


図 4 自己相関ロックイン画像 (載荷荷重 206kN)

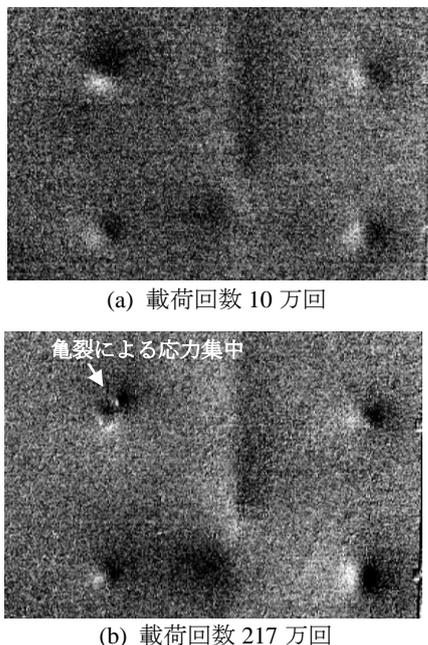


図 3 赤外線画像 (載荷荷重 206kN)

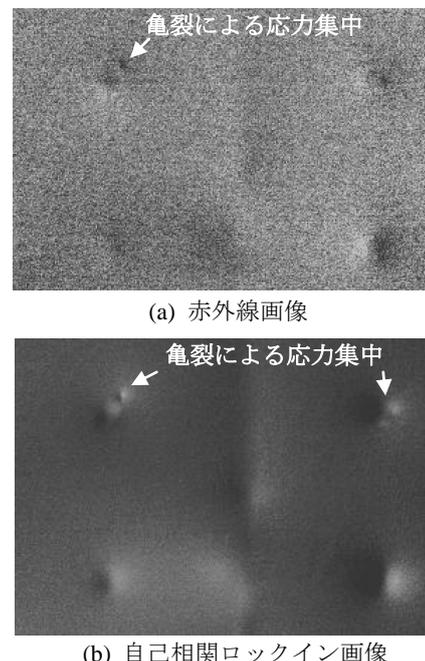


図 5 載荷荷重 100kN での検討 (載荷回数 217 万回)