赤外線応力分布計測に基づく ICR 処理による疲労き裂補修効果の検証

神戸大学 正会員 〇阪上 隆英, 京都大学 正会員 石川 敏之 神戸大学 神田 拓郎, 大谷 直矢

1. 研究目的

疲労き裂の発生・進展が問題となっている鋼構造物を適切に維持管理するためには、①疲労き裂の検出、②疲労 き裂の進展性評価、③疲労き裂の補修およびその効果確認が必要となる.これらを実施できる手法として、著者ら はこれまでに赤外線カメラによる熱弾性応力分布計測の適用について検討を行ってきた^(1,2).赤外線カメラを用いた 熱弾性応力計測によれば、鋼橋を走行する車両載荷に起因するき裂周りの実働応力変動分布を、遠隔・非接触に可 視化計測できるため、き裂先端に現れる特異応力場をもとに疲労き裂を検出することができる⁽¹⁾.また、き裂進展 駆動力となるき裂先端の応力分布の破壊力学的検討により、疲労き裂の進展性予測に基づく構造健全性評価が可能 になる⁽²⁾.さらに、疲労き裂対策として、何らかの補強・補修が行われた場合には、その前後での疲労き裂存在部 の実働応力分布を計測・比較し、必要に応じて応力分布に基づく構造健全性の再評価を実施することにより、補強・ 補修による構造物の延命効果のその場検証を行うことが可能となるものと考えられる.本研究では、ICR 処理

(Impact Crack Closure Retrofit Treatment)の前後において、赤外線カメラを用いた熱弾性応力分布計測を行い、疲労 き裂補修効果の検証が可能であるかどうか基礎検討を行った.

2. 熱弾性応力計測法および自己相関ロックイン法

熱弾性応力計測では、引張応力作用下の温度降下および圧縮応力作用下の温度上昇に基づき、主応力和の変動を 計測する.しかしながら、熱弾性効果による温度変動は計測ノイズと同程度に微小な場合があり、高精度な応力分 布計測を行うためには、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、不規則に変動する載荷条件の下でも相対応力分布を高精度に求めることができる.

3. 疲労き裂の補強・補修対策

疲労き裂の補強・補修対策としては、SFRC 舗装や当て板補強等による作用応力の低減、ストップホール施工や ピーニングによるき裂先端や表面の処理が行われている. ICR 処理は、疲労き裂の補修のために開発された技術で あり、エアーツールの一種であるピーニングツールによるき裂近傍の打撃によって、鋼材表面を塑性流動させて疲 労き裂を閉口・圧着させることにより、き裂進展駆動力を低下させるものである. このような補強・補修が的確に 行われたかどうかを検証するためには、き裂進展駆動力となるき裂先端周辺の応力場が補強・補修によりどれ程変 化したかを、熱弾性応力計測により直接的に計測することが有効であると考えられる.

4. 実験概要

鋼床版のデッキプレートおよび垂直補剛材の間の溶接部 を模擬した,図1に示すような面外ガセット溶接継手試験体 の溶接止端部から発生・進展した疲労き裂を計測対象とした. 試験体を図2に示す板曲げ振動疲労試験機に取り付け,面外 ガセット溶接止端から12mmの位置の最大公称応力0MPa, 最小公称応力-122MPa,周波数22.0Hzで20万回繰り返し載 荷したところ,止端部から両側にそれぞれ10mm疲労き裂 が発生した.ICR前の状態での応力分布計測を行った後,ICR 処理を行った.ICR処理の条件としては,空気圧0.5MPa,



キーワード 赤外線カメラ,熱弾性応力計測,非破壊評価,ICR 処理,疲労き裂,鋼床版 連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町1-1 神戸大学大学院工学研究科 打撃周波数 90Hz とし、10mm 進展したき裂を閉口させた後,溶接止端 のき裂を閉口させた.ICR 処理の後は,最大応力0MPa,最小応力-128MPa, 周波数 22.0Hz で 60 万回載荷したが,応力範囲に変化が見られなかった ので,最大応力-13.5MPa,最小応力-175.5MPa,周波数 23.3Hz で 20 万 回載荷(1 万回で裏面からき裂が発生)を行い,疲労き裂周辺の応力分布 の変化を観察した.熱弾性応力計測のための赤外線カメラとしては,320 ×256 画素の InSb アレイセンサを搭載した温度分解能 25mK の機種を 用いた.計測対象の応力変動に伴う温度変動を,撮影速度157 Hz で 10000 フレームの時系列赤外線画像として計測し,200 フレームのデータを自 己相関ロックイン処理することにより相対応力分布を求めた.

5. 計測結果

ICR 処理を行う前の相対応力分布画像を図3に示す.自己相関処理の ための参照信号取得点は図中の〇印の位置に設定した.図3のカラーバ ーの数値は参照信号取得点の変動応力との相対比を表している.画像に おいて,3か所に応力が集中している部分が検出されており,その位置 は左側に進展した疲労き裂の先端位置,および右側に進展した分岐き裂 の2つの先端位置に一致していた.また,き裂の中央部においては,応 力はほとんど作用していないことがわかる.

次に、ICR 処理後に載荷を行った場合に得られた相対応力分布画像を 図4に示す.ICR 処理によって、き裂を閉口・圧着させたことにより、 き裂先端の特異場による応力集中が消失するとともに、き裂の中央部が 閉口・圧着したため高い圧縮応力が作用していることがわかる.ICR 処 理後70万回(応力範囲を上げてから10万回)載荷した時点での相対応 力分布画像を図5に示す.裏面のき裂の発生・進展にともなって、ICR 処理直後に見られたき裂中央部での圧縮応力分布が消失し、溶接部近傍 はほぼ均一な圧縮応力場となっている.さらに、ICR 処理後79万回(応 力範囲を上げてから19万回)載荷した時点での相対応力分布画像を図6 に示す.ICR 処理前に進展していた疲労き裂の先端位置付近の応力集中 が再び高くなっており、ICR 処理によるき裂閉口・圧着の効果が無くな り、裏側の疲労き裂の進展とともに表面の疲労き裂が再び進展を開始す る状態になっていることがわかる.

6. まとめ

鋼構造物の疲労き裂対策としての ICR 処理の前後で,赤外線カメラを 用いた熱弾性応力分布計測を行った.その結果, ICR 処理によるき裂先 端特異場の消失ならびに処理後の再載荷による応力場の変化を確認す ることができ,本手法による疲労補修効果の検証・評価の可能性を確認 することができた.

参考文献

- (1) 阪上隆英:疲労き裂の検出技術,土木学会第11回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集, pp.93-102, 2008.
- Spring Crack 図3 ICR 処理前の相対応力分布画像 0.5 図4 ICR 処理後の相対応力分布画像 1.5 0.5 図 5 ICR 処理後 70 万回載荷時の 相対応力分布画像 15 0.5

図 6 ICR 処理後 79 万回載荷時の 相対応力分布画像

(2) 佐藤基洋,和泉遊以,阪上隆英,久保司郎:赤外線応力分布計測データに基づく応力拡大係数評価の高精度化, 日本材料学会第15回破壊力学シンポジウム講演論文集, pp.374-378, 2011.