

熱弾性応力分布計測結果の破壊力学評価による鋼橋の疲労き裂補修効果の検証

神戸大学 学生会員 ○東 智之
 本州四国連絡高速道路 正会員 溝上 善昭, 正会員 中山 和真
 神戸大学 正会員 阪上 隆英, 正会員 塩澤 大輝, 学生会員 藤本 泰成
 滋賀県立大学 正会員 和泉 遊似

1. 緒言

橋梁などのインフラ構造物の安全性の維持には、定期検査と適切な補修、その後の補修効果の検証が重要である。非破壊検査手法の一つに、計測された表面温度変動分布から熱弾性効果に基づき応力分布を計測する、赤外線応力測定法がある。この手法により、構造物に作用する広範囲の応力変動分布の評価が可能となり、また、補修による応力集中の変化や応力の低減効果を視覚的に確認できる。本研究では、鋼橋の溶接部に発生した疲労き裂を対象に補修を実施し、その前後で熱弾性応力測定を行うことで、補修による応力低減効果について検証した。また、計測結果をもとに応力拡大係数を算出することにより、補修後の疲労寿命の向上等の評価を行った。

2. 計測方法

2-1 熱弾性効果

断熱状態の材料に弾性変形が生じる時、主応力和 $\Delta\sigma$ と温度変化 ΔT の関係は次式のように表される。

$$\Delta T = -\frac{\alpha}{\rho C_p} T \Delta\sigma = -k T \Delta\sigma \quad (1)$$

α :線膨張係数, ρ :密度, C_p :定圧比熱

T :絶対温度, k :熱弾性係数

赤外線サーモグラフィを用いて得られる温度変動データから、式(1)に基づき主応力和の変化量を求めることができる。

2-2 自己相関ロックイン処理

自己相関ロックイン処理¹⁾は荷重変動に関する参照信号を外部入力せず、計測視野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、これを用いてロックイン処理を行う手法である。これにより、ノイズ改善された相対応力分布画像を得ることができる。

2-3 応力拡大係数評価

図1に示すような無限板中のき裂を考える。赤外線サーモグラフィによって得られる主応力和 $\sigma_r + \sigma_\theta$ とモードIの応力分布解の級数展開式の関係は、次式で表される。

$$\sigma_r + \sigma_\theta = \left(\sqrt{\frac{2}{\pi r}} \cos \frac{1}{2} \theta \right) K + C_2 + \left(\sqrt{r} \cos \frac{1}{2} \theta \right) C_3 + \dots \quad (2)$$

本研究では式(2)の右辺の1項のみを考慮した関数形に対し、データフィッティングにより応力拡大係数 K を算出した。

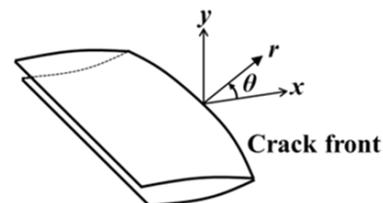


図1 き裂前縁と座標系

3. 試験内容

鋼橋において、疲労き裂が発生したウェブギャップ板に対して、橋上を荷重車が通過した際の熱弾性温度変動を量子型赤外線サーモグラフィにより計測した。計測箇所において、補修対策の前後で2回の熱弾性応力測定を行い、補修効果を検証した。荷重車の総重量は214 kNであり、計測箇所直近の車線を荷重車が80km/hで通過した時の応力変動を計測した。

補修対策としては、ウェブギャップ板の溶接部に集中する応力を当て板に分配させる、図2に示すような当て板補修を施した。その際には、当て板に確実に応力を負担させることができるよう、当て板と横桁下フランジをボルトで固定する構造とした。当て板には、き裂周辺の赤外線計測のための観測孔を設けた。

キーワード 赤外線サーモグラフィ 熱弾性応力計測 非破壊評価 疲労き裂 補修効果検証 鋼構造
 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

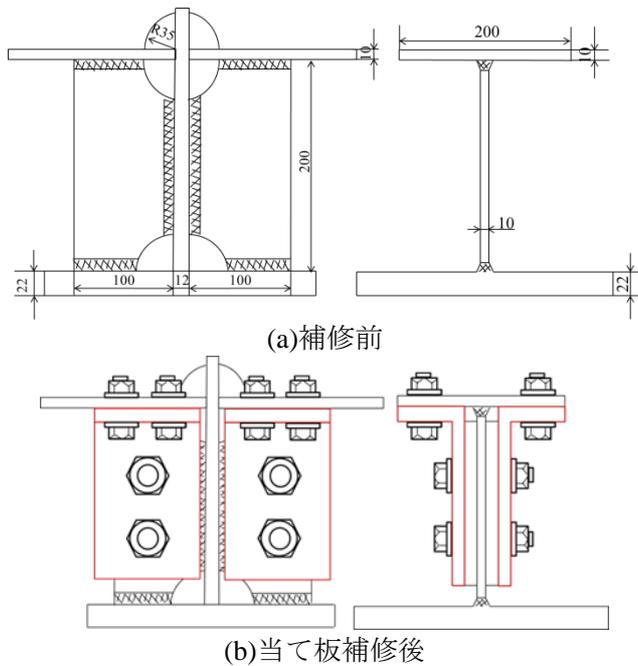


図2 ウェブギャップ板に対する当て板補修

4.試験結果および考察

当て板補修前後のウェブギャップ板の写真と、自己相関ロックイン画像を図3に示す。また、き裂先端からき裂進展方向に15mmの間で、1mmごとに計測点を設け、計16点における主応力和変動を計測した結果を図4に示す。計測は5回行い、それぞれの主応力和変動の最大値を計測回数で平均化した値を図示している。図より、き裂先端での応力集中は補修前後で見られるものの、全計測点で作用応力が減少していることがわかる。応力の減少率は25~30%程度であり、当て板補修の効果が確認できた。

次に、補修によるき裂進展抑制効果を定量的に評価するために、式(2)に基づき応力拡大係数範囲 ΔK を算出した。その結果、 ΔK は14.2 MPa \sqrt{m} から10.7 MPa \sqrt{m} に減少していることがわかった。

応力拡大係数範囲 ΔK とき裂伝ば速度 da/dn の関係は、以下の式で表される。

$$da/dn = C(\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (3)$$

太田ら⁽²⁾が行ったSM490鋼に対する実験結果によれば、き裂進展曲線から求めた定数は、 $C = 4.80 \times 10^{-13}$ 、 $m = 3.68$ 、 $\Delta K_{th} = 9.3$ である。これに基づき、 ΔK から da/dn を推定できるものとすれば、その値は補修前で 2.31×10^{-8} mm/cycle、補修後で 1.04×10^{-8} mm/cycleとなり、当て板補修による作用応力軽減によって、き裂進展速度は約55%低減できることになる。

5.結言

赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力計測により、当て板補修による作用応力低減効果の確認ならびにき裂進展抑制効果の破壊力学的定量的評価が可能であることを示した。

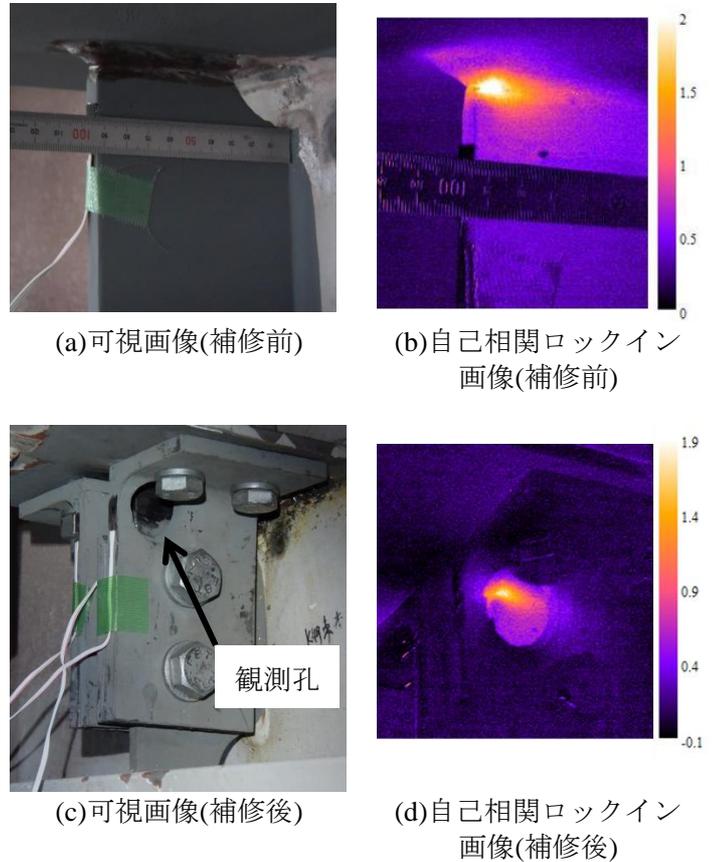


図3 作用応力分布の計測結果

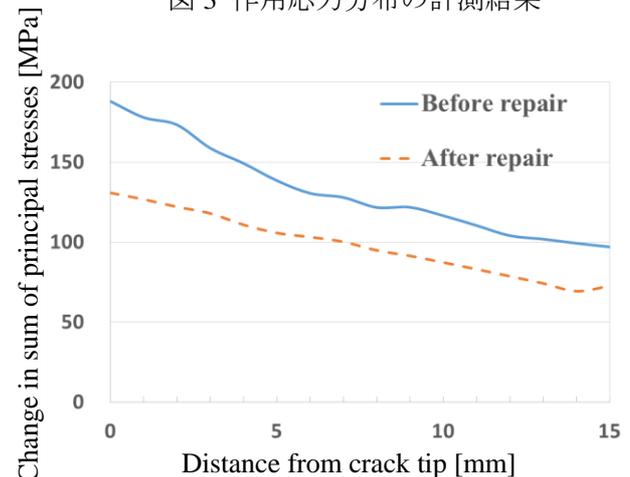


図4 き裂先端近傍の応力低減効果

参考文献

- 1) T. Sakagami “Remote nondestructive evaluation technique using infrared thermography for fatigue cracks in steel bridges FFEMS 38-7, pp.755-779, 2015.
- 2) 太田昭彦, 鈴木直之, 小菅通雄, 前田芳夫, 廻俊夫, 圧力容器用鋼及び構造用鋼突合せ溶接継手の疲労き裂伝ば特性, データシート資料集, 1995