熱弾性応力計測に基づく溶接構造物の疲労き裂補修効果の検証

神戸大学　正会員　○塩澤　大輝
本州四国連絡高速道路　正会員　有馬　敬育，　正会員　溝上　善昭，　正会員　奥村　淳弘
神戸大学　正会員　阪上　隆英，　学生会員　井原　航生

1. 緒言

経年化橋梁の安全性を維持して行くためには，構造物に発生した疲労損傷を検出するとともに，その進展性を対象部材に作用する実働応力の計測に基づき評価することが必要である．実働応力を非破壊評価できる手法の一つに，熱弾性応力測定法がある．本手法は，動的載荷の下で計測された熱弾性効果による表面温度変動分布に基づき応力分布を計測するもので，構造部材に作用する応力変動分布の面的な定量的画像化計測を可能とする．本研究では，まず熱弾性実働応力分布計測結果に基づき評価した応力拡大係数範囲と亀裂進展速度の関係を求めた．さらに，鋼橋部材の溶接部に発生した疲労き裂に対し，補修を施した前後で熱弾性応力測定を行い，補修による応力低減ならびに亀裂進展抑制の効果を検証した．

2. 計測原理

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 の関係は次式で表される．

$$\Delta T = -kT\Delta\sigma \qquad (1)$$

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 応力拡大係数範囲評価

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．

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

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，縦軸に $1/(\sigma_r+\sigma_\theta)$，横軸に $\sqrt{r}$ を取り，実験値と原点を通る近似直線の傾きから応力拡大係数範囲を算出した．き裂先端ごく近傍での熱拡散の影響を避けるため，本研究ではき裂先端から5mm～15mmの範囲の応力変動値を用いて応力拡大係数範囲を算出した．

2-3 自己相関ロックイン処理[1)]

自己相関ロックイン処理は荷重変動に関する参照信号を外部入力することなく，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．

3. 試験内容

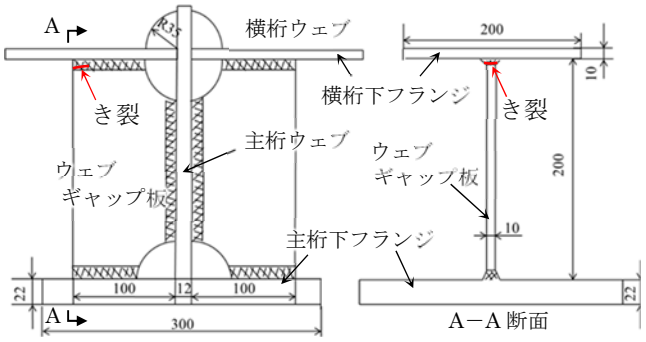
鋼床版桁において，疲労き裂が発生したウェブギャップ板に対して，橋上を荷重車が通過した際の熱弾性温度変動を量子型赤外線サーモグラフィにより計測した．計測箇所において，補修対策の前後で熱弾性応力測定を行い，補修効果を検証した．荷重車の総重量は214kNであり，計測箇所直近の車線を荷重車が80km/hで通過した時の応力変動を計測した．補修対策としては，ウェブギャップ板の溶接部に集中する応力を当て板に分配させる，図1に示すような当て板補修を施した．当て板には，き裂周辺の赤外線計測のための観測孔を設けた．

4. 実験結果および考察

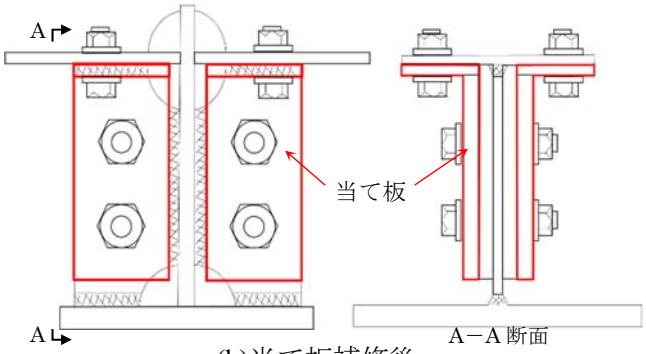
当て板補修前後のウェブギャップ板の写真と，自己相関ロックイン画像を図2に示す．計測は，補修前，補修後(き裂存置)，および補修後(き裂除去)の計3回行った．図2(a)および(b)には，もっとも高い応力が発生している箇所をき裂先端部として，その箇所での応力値を示している．図2(a)より，補修前ではき裂先端に応力が集中していることが分かる．図2(b)に示したき裂存置状態での当て板補修後の結果

キーワード　赤外線サーモグラフィ　熱弾性応力計測　非破壊検査　疲労き裂　鋼橋梁　進展性評価
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

© Japan Society of Civil Engineers



(a)補修前



(b)当て板補修後

図1　ウェブギャップ板に対する当て板補修

を見ると，当て板に設けた測定用の窓のR部や，当て板と横桁下フランジの接触面に応力が集中していることが分かる．き裂先端における応力については約52%の低減効果が見られた．また，図2(c)に示した疲労き裂除去後における当て板補修の結果によると，最も大きな応力値が計測された場所における応力値が-79MPaとなり，き裂除去前における最大応力-68MPaから値が増加しているが，施工した当て板を一旦取り外してき裂を除去した後，再設置をしたことによる応力伝達状態の変化が一因と考えられる．

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は補修前の11.81MPa·m$^{\frac{1}{2}}$から，補修後(き裂存置)では6.70MPa·m$^{\frac{1}{2}}$に減少していることを確認した．この応力拡大係数範囲の値を用いて，当て板補修前後におけるき裂の進展速度の変化について考察する．疲労き裂進展速度da/dnと応力拡大係数範囲ΔKの関係式であるパリス則は，以下の式で表される[2)]

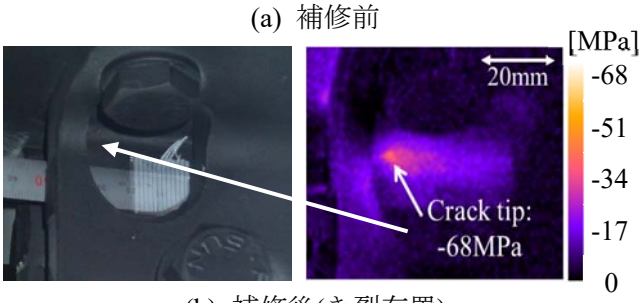
$$\frac{da}{dn} = C\Delta K^m \qquad (3)$$

本研究では，ウェブギャップ板を模擬した試験体を用いた疲労試験から，以下のようにパリス則の定数を求めた．

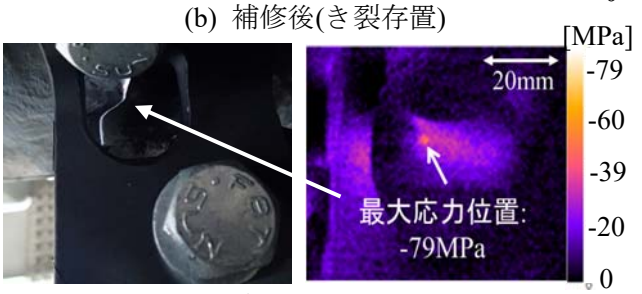
$$\frac{da}{dn} = 1.45 \times 10^{-12}\Delta K^{3.21} \qquad (3.1)$$

この式に，当て板補修前後における応力拡大係数範囲を代入すると，補修前のき裂進展速度は4.01×10^{-9}m/cycles，補修後のき裂進展速度は6.50×10^{-10}m/cyclesとなった．これにより，き裂進展速度は約83%低減することがわかった．

(a) 補修前



(b) 補修後(き裂存置)



(c) 補修後(き裂除去)

図2　作用応力分布の計測結果(左から可視画像，自己相関ロックイン画像)

5. 結言

赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性実働応力分布計測により，当て板補修による作用応力低減効果を確認した．さらに，き裂進展抑制効果を破壊力学に基づき定量評価できる可能性を示した．

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) "The Paris law". Fatigue crack growth theory. University of Plymouth. Retrieved 21 June 2010.

© Japan Society of Civil Engineers