

熱弾性応力計測による鋼構造部材の疲労き裂進展性評価

神戸大学 学生会員 ○寺内 勇希

本州四国連絡高速道路 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, 正会員 塩澤 大輝, 学生会員 東 智之

1. 緒言

鋼橋梁などのインフラ構造物の安全性を維持するには、非破壊評価による疲労き裂の検出と進展性評価、またそれに基づき行われた補修効果の検証が重要である。非破壊評価手法の一つに、赤外線サーモグラフィによる熱弾性応力計測がある。計測した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この手法は、遠隔から非破壊・非接触計測が可能で、広範囲の応力変動分布の評価が可能である。本研究では、鋼構造部材を模擬した試験体を用いて、板曲げ疲労試験を行い、き裂の進展速度と、計測した応力変動分布をもとに算出した応力拡大係数範囲の関係を調べ、疲労き裂の進展性評価の可能性について実験的検討を行った。

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 $\Delta\sigma$ と温度変化 ΔT の関係は次式で表される。

$$\Delta T = -k T \Delta\sigma \quad (1)$$

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

図1 に示すような半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 $\sigma_r + \sigma_\theta$ 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、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。

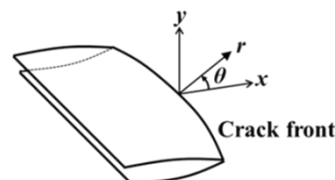


図1 き裂前縁と座標系

3. 試験内容

3-1 対象とする部材

供用中の鋼橋梁において、図2に示すような縦桁-横桁交差部の補剛材(以下、ウェブギャップ板と呼ぶ)の溶接部に疲労き裂が発生、進展することがある。

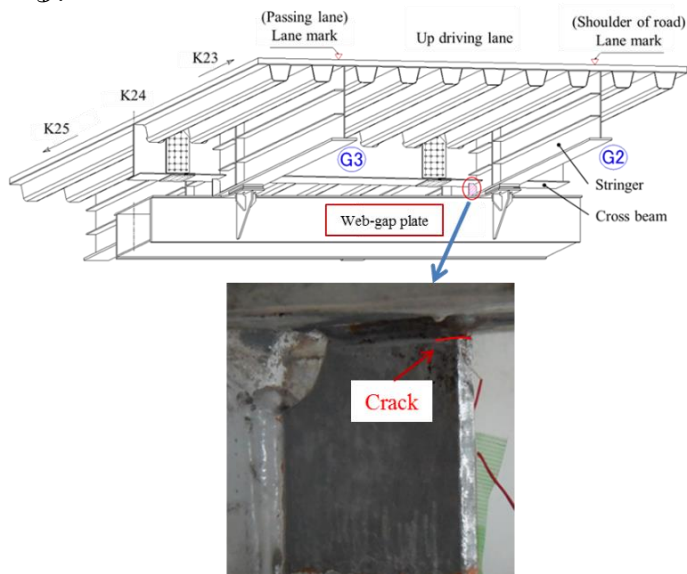


図2 ウェブギャップ板に発生する疲労き裂

疲労き裂発生・進展の主な要因は、活荷重によりウェブギャップ板の上縁端部に大きな応力が発生することにある⁽¹⁾。疲労き裂が橋梁の主構造部材に進展すると、重大な損傷に発展する可能性があるため、適当な時期に補修する必要がある。補修計画策定のためにも疲労き裂の進展性を評価することは重要である。

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

3-2 試験体

図3のようなウェブギャップ板を模擬した試験体を製作した。材質は主に橋梁の溶接構造物に用いられるSM400Aで、CO₂ガスシールドアーク溶接で接合されている。

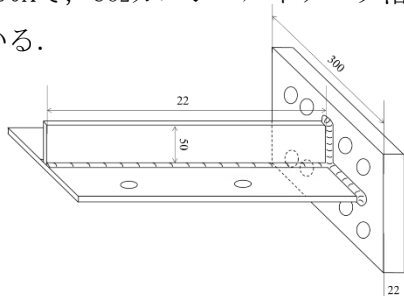


図3 ウェブギャップ試験体

3-3 試験条件

本試験に用いた板曲げ振動疲労試験機を図4に示す。架台に片持ち状態になるようにセットされた試験体の先端に、偏心錘を有するモータを取り付け、モータを回転させる事により試験体に繰返し曲げ負荷を与えることができる。

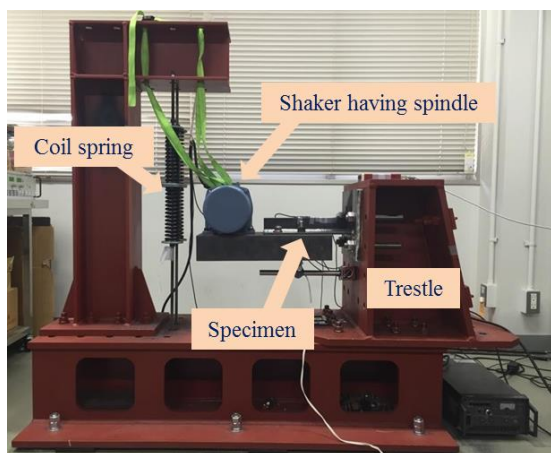


図4 板曲げ振動疲労試験

試験は応力比 $R = -1$ で行い、溶接止端部にかかる応力振幅は、モータの負荷周波数を変えることにより制御される。応力振幅値は試験体に貼付された複数のひずみゲージによるひずみ値を直線外挿することで推定された値により確認した。赤外線サーモグラフィ画像に画像処理を施すことにより得られた応力相対分布図(図5)において、応力振幅が最大となる位置をき裂先端とし、計測サイクル毎のき裂先端位置の変化からき裂進展量を求めた。荷重周波数は12～17.5Hzの範囲で変化させ、溶接止端部に200～600MPa程度の繰返し負荷を加えた。

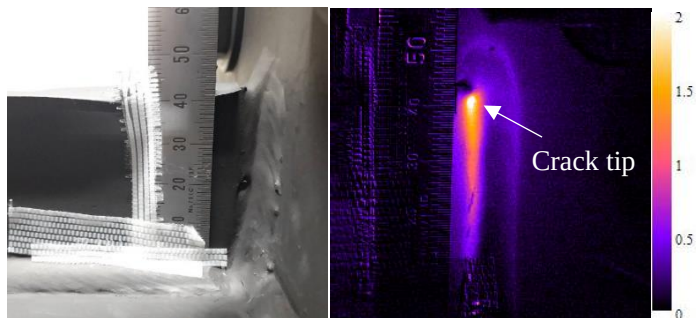


図5 疲労き裂発生部の応力相対分布図

4. 試験結果

試験により得られた応力拡大係数範囲と疲労き裂進展速度の関係を図6に示す。

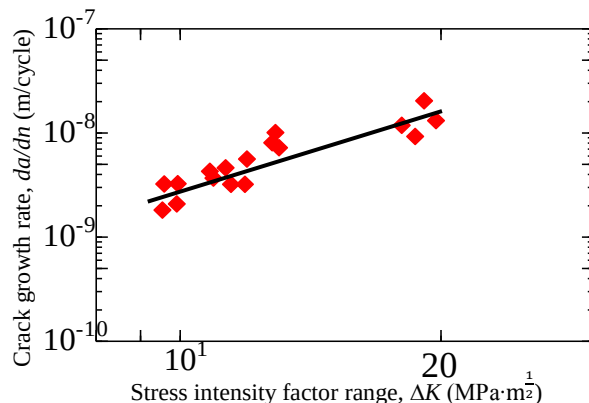


図6 応力拡大係数範囲とき裂進展速度

一般に、疲労き裂進展速度と応力拡大係数範囲の関係は、両対数グラフにおいて直線で与えられる事が知られている。この関係はパリス則と呼ばれ、疲労き裂進展速度 da/dn と応力拡大係数範囲 ΔK の関係式は次式のように表される⁽²⁾

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

C および m は材料により決まる定数である。図6の近似直線からこれらを求めると $C = 1.06 \times 10^{-11}$ 、 $m = 2.46$ となった。一般に金属材料において m は2～4を取ることが分かっていることから、本実験で得られた ΔK - da/dn の関係は妥当なものであると考えられる。本実験を通じて、赤外線サーモグラフィを用いた熱弾性応力計測で得られた実働応力分布から求められた応力拡大係数範囲をもとに、今後のき裂進展量の予測や危険性の評価を、破壊力学に基づき定量的に行うことができる可能性が示された。

参考文献

- (1) 高田大資, 藤城忠朗, 大谷康史: 鋼床版支点部補剛材に生じた亀裂の補修対策検討, 土木学会第70回年次学術講演会, pp.1061-1062, 2015.9.
- (2) P. Paris, F. Erdogan, A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. J. Basic Eng., Vol. 85, No. 4, PP. 528-533, 1963.