

疲労き裂を開口させて寿命を向上させる技術の開発

名古屋大学 正会員 山田 健太郎, 石川 敏之, 学生員 柿市 拓巳, 李 薈

1. 序論

鋼橋では, 発見された疲労き裂が大きい場合, 早急な補修が行われるが, 図 - 1 に示す小さなき裂やすぐに破壊につながる可能性が低い疲労き裂は補修されず, 経過観察することが多い。しかし, 大型車交通の繰り返しによって疲労き裂が進展することもあり, き裂発見時に, その進展を止める, あるいはき裂の進展を遅延させ, 残存寿命が十分に確保できる簡易な補修方法があれば便利である。

著者らは, 疲労き裂の開口部近傍の母材を叩いて, 鋼材表面に塑性変形を生じさせ, 疲労き裂を開口させることにより, き裂の進展の遅延させる工法を開発した¹⁾。この方法では, 使用する機材がコンパクトかつ軽量であるため, 比較的簡易に施工が可能で, 補修のコストと労力が大幅に低減できる。

本研究では, 疲労き裂を開口することによるき裂進展の遅延効果を, 破壊力学的考察と板曲げ疲労試験を行い明らかにする。

2. 疲労き裂の開口方法

本工法は, 図 - 2 に示すように, 発生した疲労き裂近傍の母材を叩き, 塑性変形させてき裂を開口させる。図 - 2(a) は溶接止端の疲労き裂の開口方法を示し, 図 - 2(b) は, 母材の疲労き裂の開口方法を示している。本工法は, ハンマーピーニングや UIT 処理と違って, 溶接止端から発生する疲労き裂の前面を 1~2 往復叩いて塑性変形させてき裂を開口する。本研究で用いたエアーツール(フラックスチッパー)を図 - 3 に示す。タガネの先端を, 平坦な面が $4 \times 5\text{mm}$ 程度になるように加工した。母材を叩く際の空気圧は $0.5 \sim 0.6\text{MPa}$, 打撃数は 90Hz である。ただし, タガネの先端の形状によっては空気圧を変更する必要がある。

3. 破壊力学によるき裂開口の効果の解明

破壊力学を用いて, 疲労き裂開口によるき裂進展の遅延効果を説明する。まず図 - 4(a)に示す 2 次元の表面き裂を考える。疲労き裂が開口している場合, 応力拡大係数 ΔK は次式で与えられる。

$$\Delta K = F \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

ここに, F : 補正係数, $\Delta \sigma$: 応力範囲

さらに, 応力拡大係数 ΔK を用いて, き裂進展速度 da/dN が次式で与えられる。

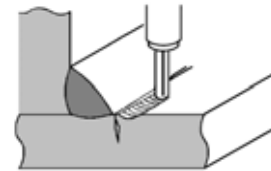
$$da/dN = C (\Delta K^m - \Delta K_{th}^m) \quad (2)$$

ここに, C, m : 係数, ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数範囲

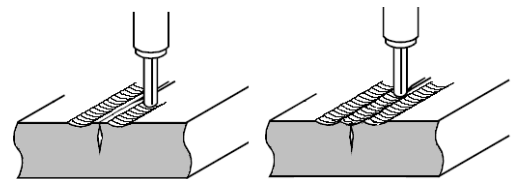
き裂の表面が開口した場合, このき裂は図 - 4(b)に示すような内部き裂と考えられるため, き裂長さが $a' \leq a/2$ になる。したがって式(1)の a へ $a' (= a/2)$ を代入して, き裂を閉



図 - 1 鋼橋に発生した疲労き裂



(a) 溶接止端のき裂の閉口

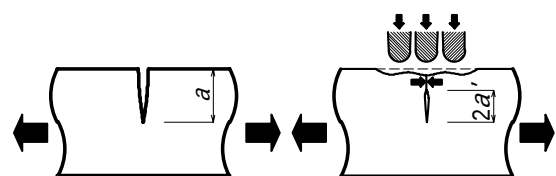


(b) 母材に進展したき裂の閉口

図 - 2 疲労き裂の閉口方法



図 - 3 エアーツール(フラックスチッパー)



(a) き裂開口 (b) き裂閉口

図 - 4 2次元のき裂

口した場合の応力拡大係数は $\Delta K = 0.71F\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$ になる。

例えば鋼材では, $m=2.75$, $\Delta K_{th}=2.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ に対して, き裂が閉口された場合のき裂進展速度は, 表面き裂のその約 1/3 程度に遅延でき, 作用応力によっては完全に停止できる。

4. 導入される圧縮残留応力

疲労き裂を導入するために図 - 5 に示す鋼板(SM400)に置かれた幅約 10mm の溶接ビードに半楕円の切込み加工(幅 0.4mm)を施し, 板曲げ振動疲労試験機²⁾により疲労き裂を発生させた。疲労き裂が鋼材表面で 10mm 程度に成長した後, 疲労き裂が発生した近傍の溶接ビードをグラインダーで削り取り平滑にし, 疲労き裂の両端とその直上を図 - 2(b)に示した方法で 1~2 往復叩いて疲労き裂を閉口した。

疲労き裂を閉口させた後, き裂位置の鋼材表面および表面から 0.05mm 電解研磨した面に導入されている圧縮残留応力を X 線残留応力測定法により調べた。残留応力の計測位置を図 - 6 に示す。計測された残留応力を表 - 1 に示す。鋼材表面では 150MP 以上, 表面から 0.05mm の位置では 100MPa 以上の圧縮残留応力が残されていることが分かる。作用応力が圧縮残留応力以下の場合, 疲労き裂が閉口しない。

5. 疲労試験によるき裂閉口の効果の確認

図 - 5 の平板の疲労き裂および図 - 7 に示す面外ガセット(SM490)の溶接止端の疲労き裂を対象として, 疲労き裂を閉口させた効果を確認する。板曲げ振動疲労試験機²⁾を用いて疲労き裂を発生させ, 図 - 2 に示す順序で 1~2 往復き裂近傍の母材を叩き, き裂を閉口した後, 再度, 同じ条件で板曲げ疲労試験を行った。面外ガセット試験体では, 疲労き裂が溶接止端を離れる寸前の段階(N_b)および溶接止端から離れて 10mm 進展した段階(N_{10})の両方に対して疲労き裂の閉口を行った。疲労試験の結果を図 - 8 に示す。疲労き裂を閉口した後の繰返し回数が横軸に示されている。この図には, 面外ガセット試験体に対して, 疲労き裂を発生させた際の結果も示されている。この図から, 疲労き裂(N_b , N_{10})を発生させた際の繰返し回数が 100 万回以下であったが, それらの疲労き裂を閉口させることにより疲労強度が大幅に改善され, 1000 万回以上の繰返しを受けても疲労き裂が再発生せず, き裂進展の遅延・停留効果が大きいことが分かる。

6. 結論

本研究では, 破壊力学的検討と板曲げ疲労試験を行い, 疲労き裂を閉口することにより, き裂の進展が遅延すること, 場合によっては停止することが明らかにされた。したがって, 本工法は, き裂の進展を止める, あるいは遅延させ残存寿命を確保できる簡易な補修方法になり得ると考えられる。

【謝辞】本研究を行うにあたり, 瀧上工業の織田博孝氏ならびにトピー工業の山田聡氏に試験体の製作などで大変にお世話になりました。ここに記して謝意を示します。

【参考文献】1)山田健太郎, 石川敏之: 鋼構造物の疲労き裂補修方法, 特願 2008-299880, 特許出願人 名古屋大学, 2008。

2)山田健太郎, 小藺江朋亮, 小塩達也: 垂直補剛材と鋼床版デッキプレートのすみ肉溶接の曲げ疲労試験, 鋼構造論文集, 第 14 巻, pp.1-8, 2007。

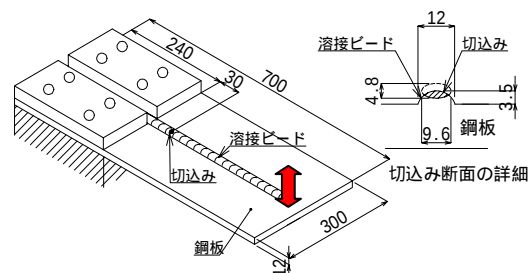


図 - 5 溶接ビードのある平板試験体



図 - 6 残留応力の計測位置

表 - 1 残留応力(MPa)

表面	-192	-297	-154
0.05mm	-158	-102	-117

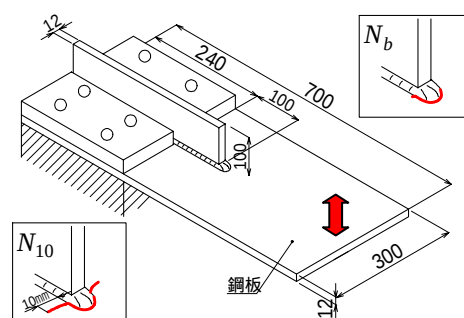


図 - 7 面外ガセット試験体

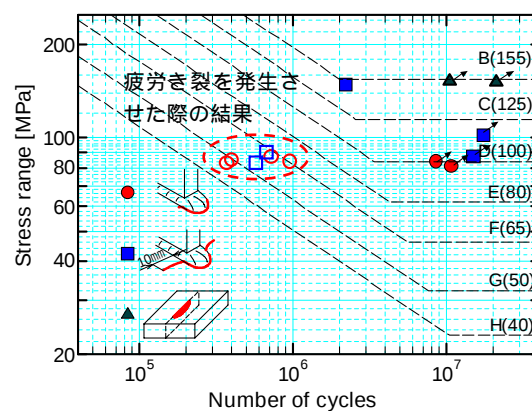


図 - 8 板曲げ疲労試験結果