

京都大学大学院 学生会員 ○松本 理佐, 正会員 石川 敏之, 服部 篤史, 河野 広隆
中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋(株) 正会員 山田 健太郎

1.はじめに

現在、鋼構造物に発生した疲労き裂の応急措置としてストップホールが用いられる場合が多い。しかし、ストップホール縁には高い応力集中が発生するので、ストップホールから疲労き裂が再発生する可能性がある。ストップホール縁の応力集中を低減させる方法としては、ストップホールをボルト締めする方法や鋼板当て板を行う方法があるが、ストップホールに当て板やボルトを施工できないような狭隘な箇所では、これらの方法を用いることができない。このような背景から、著者らは、ICR 処理によってストップホール間のき裂の表面を閉口しストップホール縁の応力集中を低減させる工法を提案した¹⁾。本研究では、本工法を施すことによって、板曲げ荷重に対する疲労寿命向上効果を確認する。

2.疲労試験

本研究で用いた帯板試験体 (SM490YA) を図 1 に示す。試験体は、板厚 12mm とした。ICR 処理はストップホール間の切込み部に対して鋼板の両面で施工した。ICR 処理を施工していない試験体を SH 試験体、ストップホール間の両き裂表面に ICR 処理を施工した試験体を SH+ICR 試験体とする。また、図 1 に示すようにゲージ A、B を鋼板に貼付した。ゲージ B を貼付したのは SH+ICR 試験体のみである。図 2 に ICR 処理後の切断面の一例を示す。この図から鋼板表面から 1.3~1.5mm 程度接触していることが分かる。

2.1 疲労試験中の SH 試験体および SH+ICR 試験体の挙動

本研究では、片持ち状態になるようにセットされた試験体の先端へ応力比 0 となるような荷重を繰返し作用させ、疲労試験を行った。

図 3 に疲労試験時の SH 試験体と SH+ICR 試験体のゲージ A での公称応力とひずみの関係の一例を示す。この図には、SH+ICR 試験体のゲージ B での公称応力とひずみの関係も示している。SH+ICR 試験体の B において公称応力が 80MPa (図中の黒点) 以降で曲線の傾きが大きくなっている。これは、図 2 に示した ICR 処理部の開口によって、切込み近傍で応力が伝わらなくなったからである。SH+ICR 試験体の A でも、公称応力 80MPa 以降で曲線の傾きが小さくなり、応力集中が増したことが分かる。しかし、载荷徐荷過程で SH+ICR 試験体の A および B の公称応力とひずみの経路が同じなので、繰返し载荷中に ICR 処理部は開口閉口挙動を繰り返していることが分かる。また、SH+ICR 試験体では ICR 処理部が公称応力 80MPa で 開口するものの、SH+ICR 試験体のストップホールの縁に生じる応力範囲は、SH 試験体に比べて 30%程度低減した。

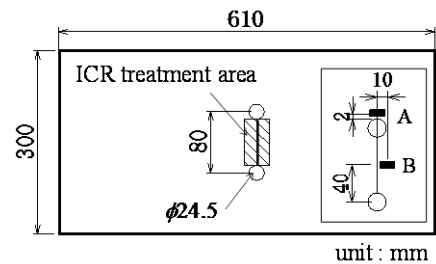


図 1 試験体

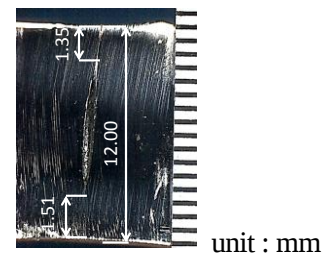


図 2 ICR 処理後の切断面

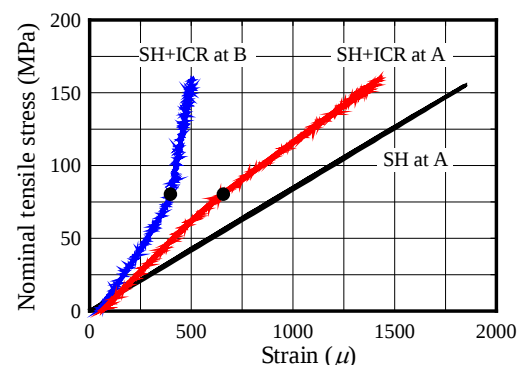


図 3 疲労試験中の公称応力とひずみの関係

その他の試験体では、SH+ICR 試験体における ICR 処理部の開口公称応力は、80～100MPa となった。

2.2 疲労試験結果

試験結果を図 4 に示す。図 4 より、SH+ICR 試験体の疲労寿命は、SH 試験体の疲労寿命と比較して 3 倍以上向上していることが分かる。今回の試験では、全試験体において疲労破壊の起点はストップホール縁であったことから、疲労寿命がストップホール縁の応力範囲で整理できるとすれば、公称応力範囲 $\Delta\sigma_n$ とストップホール縁での応力集中係数 α を用いると、疲労寿命 N は以下の式で表わされる。

$$(\alpha \cdot \Delta\sigma_n)^m \cdot N = C \quad (1)$$

式(1)を変形して、公称応力範囲と疲労寿命の関係は以下の式で表わされる。

$$\Delta\sigma_n^m \cdot N = \frac{C}{\alpha^m} \quad (2)$$

ここに、 C および m は SH 試験体のストップホール縁の応力範囲と疲労寿命の関係を表す材料定数である。今回、SH 試験体の初期き裂発生寿命に対するストップホール縁の応力範囲の $S-N$ 関係の回帰直線（き裂長 60～100mm の 6 体の試験結果）より、材料定数を定めたところ $C = 7.43 \times 10^{20}$ 、 $m = 5.83$ となった。SH 試験体では、3 次元 FEM 解析結果から $\alpha = 3.09$ とした。図 4 中の青線は、式(2)より求めた SH 試験体に関する公称応力範囲と疲労寿命の回帰直線である。

ここで、2.1 節で述べたように、SH+ICR 試験体では ICR 処理部が公称応力 80～100MPa で開いたので、公称応力によって応力集中が異なる結果となった。そこで、SH+ICR 試験体に関して、ICR 処理部の開口公称応力 $\sigma_{n,op}$ 以下でのストップホール縁での応力集中係数を α_{bop} 、ICR 処理部の開口公称応力以上でのストップホール縁での応力集中係数を α_{aop} とすると、図 5 より、SH+ICR 試験体の応力集中係数 α_{SH+ICR} は式(3)で算出できる。

$$\alpha_{SH+ICR} = \frac{\Delta\sigma_H}{\Delta\sigma_n} = \alpha_{bop} \cdot \frac{\sigma_{n,op}}{\sigma_{n,max}} + \alpha_{aop} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{n,op}}{\sigma_{n,max}}\right) \quad (3)$$

ここで、 $\Delta\sigma_H$ はストップホール縁での応力範囲、 $\sigma_{n,max}$ は公称応力の最大値である。

式(2)、(3)から算出した SH+ICR 試験体の疲労寿命の推定線を図 4 に示す。推定線と試験結果はよく一致しているので、式(2)、(3)によって、き裂を開いたストップホールの疲労寿命を予測できることが分かる。また、図 4 より、公称応力範囲が低い方が、ICR 処理による疲労寿命向上効果が大きくなることが分かる。これは、公称応力範囲が低い、つまり $\sigma_{n,max}$ が小さいほど、式(3)の右辺第二項が小さくなるからである。

3. 結論

SH+ICR 試験体において、公称応力がある値以上になると ICR 処理部が開くが、繰返し荷重を与えたとき ICR 処理部は開口閉口挙動を繰り返した。したがって、ストップホール縁に生じる応力範囲は、SH 試験体に比べて SH+ICR 試験体の方が小さくなった。また、SH+ICR 試験体に対して応力集中係数を推定する式を与えることで、SH+ICR 試験体の疲労寿命を予測した。その結果、疲労寿命の推定値は実験値とよく一致した。

謝辞 本研究の一部は、科研費(23760423)の助成を受けたものである。

参考文献

- 1) 石川敏之，松本理佐，服部篤史，河野広隆，山田健太郎：き裂表面開口によるストップホールの応力集中の低減，材料，Vol.62，No.1，pp.33-38，2013.1

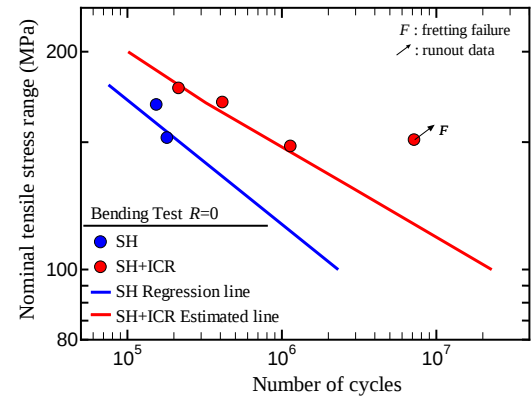


図 4 疲労試験結果

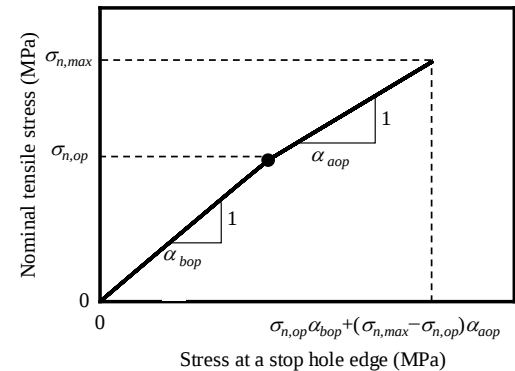


図 5 疲労試験結果