

ICR 処理によるストップホールの疲労強度向上効果に関する研究

京都大学大学院 学生員 ○松本 理佐, 正会員 石川 敏之, 河野 広隆, 服部 篤史
中日本ハイウェイ・エンジニアリング名古屋 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、き裂先端にドリル孔を設けるストップホールが用いられることが多い。しかし、ストップホール縁にはき裂の長さに応じて高い応力集中が発生するので、ストップホールのみによる補修では、ストップホール縁から疲労き裂が再発生する場合がある。このような背景から、著者らは、ICR 処理工法によってストップホール間のき裂表面を閉口することで、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、提案工法を適用することによって、ストップホールの疲労強度向上効果を板曲げ疲労試験により確認する。

2. 疲労試験

本研究で用いた帯板試験体（鋼板 SM490YA）を図 1 に示す。試験体の中央には、貫通き裂を模擬した幅 0.69mm の切込みを設け、切込みの両端にストップホールを設けた。

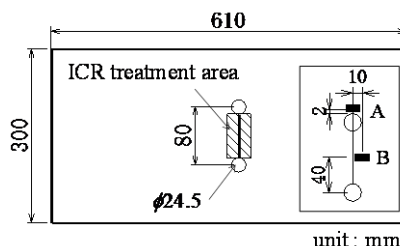


図 1 試験体



図 2 切込み部の断面

ICR 処理はストップホール間の切込み部の上

下面に施工し、切込み部を閉口させた。ICR 処理を施工した試験体を SH+ICR、切込みを有するストップホールのままの試験体を SH とする。また、図 1 に示すように、鋼板にはひずみゲージ A、B を貼付した。ゲージ B を貼付したのは SH+ICR のみである。図 2 に ICR 処理後の ICR 処理した切込み部の断面の一例を示す。鋼板表面から 1.3mm~1.5mm 程度の深さまで切込み部が閉口していることが分かる。



図 3 疲労試験

2. 1 繰返し载荷中の SH および SH+ICR の挙動

本研究では、図 3 に示すように、片持ち状態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 4 に疲労試験時の SH と SH+ICR の公称応力とゲージ A のひずみの関係の一例を示す。この図には、SH+ICR の公称応力とゲージ B のひずみの関係の一例も示している。SH+ICR 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 に示した切込み部が開くことによって、切込み近傍で応力が伝わらなくなったためである。SH+ICR の A でも、切込み部が開くことによって、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 の公称応力と A および B のひずみの経路が同じなので、载荷徐荷過程で切込み部が開閉口挙動を繰り返しており、切込み部が開閉するときの公称応力の値が一定であることが分かる。また、SH+ICR では切込み部が、公称応力 80MPa で 開口するが、SH+ICR のストップホールの縁近傍に生じるひずみ範囲は、SH に比べて 30%程度低減した。

その他の SH+ICR 試験体では、切込み部の開口公称応力は 80~100MPa 程度であった。

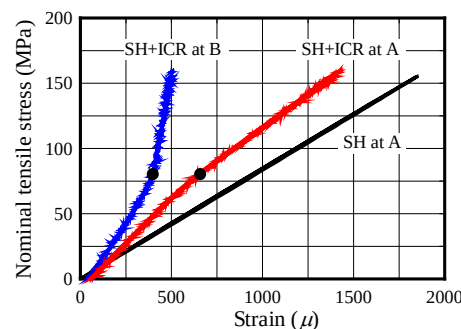


図 4 疲労試験時の公称応力とひずみの関係

キーワード ストップホール, ICR 処理工法, 疲労強度, 向上効果

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2-227 京都大学桂キャンパス 075-383-3321

2. 2 疲労試験結果

試験結果を図5に示す。縦軸は公称応力範囲、横軸はき裂発生寿命である。図5より、SH+ICRの疲労強度は、SHの疲労強度と比較して3倍以上向上していることが分かる。今回の試験では、全試験体においてき裂発生点がストップホール縁であったことから、き裂発生寿命がストップホール縁の応力範囲で整理できると考えられる。したがって、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、き裂発生寿命 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)を変形すると、公称応力範囲とき裂発生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のストップホール縁の応力範囲とき裂発生寿命の関係を表す材料定数である。今回、SHのき裂発生寿命とストップホール縁の応力範囲のS-N関係の回帰直線（SHきに対してき裂長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。切込み長さ80mmのSHでは、3次元FEM解析結果から $\alpha = 3.09$ とした。図5中の青線は、式(2)より求めたSHに関する公称応力範囲とき裂発生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では切込み部が公称応力80～100MPaで開口したので、切込み部の開口前後で応力集中が異なる結果となった。そこで、SH+ICRに関して、公称応力が切込み部の開口公称応力 $\sigma_{n,op}$ 以下でのストップホール縁の応力集中係数を α_{bop} 、公称応力が $\sigma_{n,op}$ 以上でのストップホール縁の応力集中係数を α_{aop} として、図6より、SH+ICRの平均応力集中係数 $\overline{\alpha_{SH+ICR}}$ を式(3)で算出する。

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

ここで、 $\Delta\sigma_H$ はストップホール縁の応力範囲、 $\sigma_{n,max}$ は最大公称応力である。

式(2)、(3)から算出したSH+ICRのき裂発生寿命の推定線を図5中の赤線に示す。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、き裂を閉口したストップホールのき裂発生寿命を予測できることが分かる。また、図5より、公称応力範囲が低い方が、ICR処理によるき裂発生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において、公称応力がある値以上になると切込み部が開口するが、载荷徐荷過程線では切込み部は開口挙動を繰り返し、かつ切込み部の開口するときの公称応力の値は一定であった。したがって、ストップホール縁近傍に生じるひずみ範囲は、SHに比べてSH+ICRの方が小さくなった。また、SH+ICRに対して平均応力集中係数を推定する式を与えることで、SH+ICRのき裂発生寿命を予測した。その結果、き裂発生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, 他: き裂表面閉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

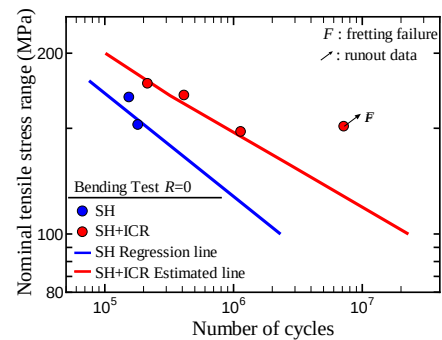


図5 疲労試験結果

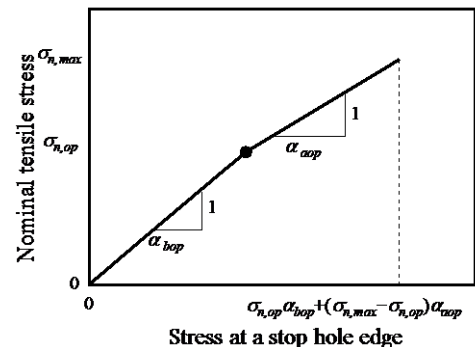


図6 SH+ICRにおける公称応力とストップホール縁のひずみの関係