

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

1. はじめに

著者らは、ICR 処理によってストップホール間に設けたスリット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、本工法による疲労強度向上効果を板曲げ疲労試験によって確認した¹⁾。しかし、圧縮の過荷重が作用すると、閉口したスリットが開き、疲労強度が低下する可能性がある。

圧縮の過荷重によってき裂が開くメカニズムを図-1 に示す。この図に示すように、ICR 処理によって閉口したスリット表面(図-3)には高い圧縮の残留応力が導入されているため(図-1 ①)、圧縮の荷重が作用すると、閉口したスリット表面が降伏する(図-1 ②)。除荷過程では、周辺の母材とともに弾性的に荷重と応力が減少し(図-1 ③～④)、スリットに導入されていた圧縮残留応力が失われ、圧縮の荷重の大きさによってはスリットが開く可能性がある(図-1 ④～⑤)。

本研究では、圧縮の過荷重がスリットを閉口したストップホールの疲労強度に与える影響を明らかにする。

2. 疲労試験

本研究で用いた帯板試験体(SM490Y)を図-2 に示す。試験体の中央には、貫通き裂を模擬した幅 0.69mm のスリットを設け、スリットの両端にストップホールを設けた。ICR 処理はストップホール間のスリットの上下面に施工し、スリットの両表面を閉口させた。ICR 処理を施工した試験体を SH(ICR)、スリットを有するストップホールのままの試験体を SH とする。過荷重を導入した試験体は SH(ICR)-OL と表記し、試験体名の末尾に導入した過荷重の大きさを記す。過荷重の大きさは、過荷重導入時に生じた公称応力の最大値である。図-3 に ICR 処理後の切断面の一例を示す。板表面から 1.3～1.5mm 程度の深さまでスリットが接触していることが分かる。

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おもて面で応力比が $R=0$ となるような板曲げ応力を繰り返し作用させた。SH(ICR)-OL では、疲労試験の前に試験体のおもて面に圧縮の過荷重を導入した。

2. 1 スリット開口時の公称応力

図-4 に SH(ICR)試験体の疲労試験中の公称応力とストップホール縁に生じるひずみの関係の一例を示す。図-4 より、公称応力が $\sigma_{n,op}$ 以上で応力-ひずみ関係の傾きが大きくなっている。これは、疲労試験中に公称応力が $\sigma_{n,op}$ 以上の範囲では、おもて面のスリットが開き、ストップホール縁の応力集中が大きくなるからである。図-5 に各試験体のスリット開口時の公称応力 $\sigma_{n,op}$ を示す。試験体 SH(ICR)-OL300, SH(ICR)-OL400 は $\sigma_{n,op}$ が 0MPa であるが、試験体 SH(ICR)-OL200 は $\sigma_{n,op}$ が 40MPa 程度である。

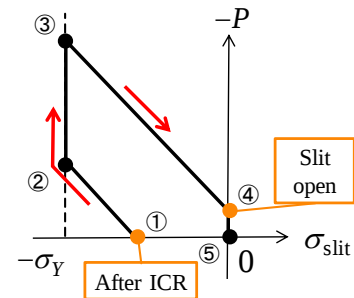


図-1 圧縮の過荷重によるスリットの開口メカニズム

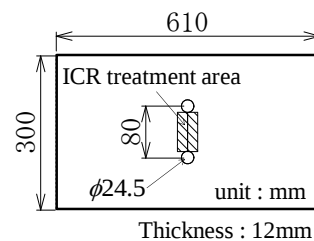


図-2 試験体

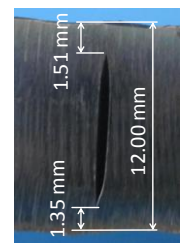


図-3 スリットの切断面

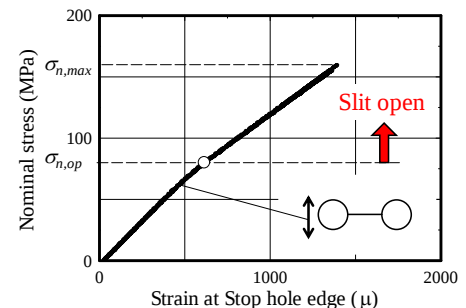


図-4 疲労試験時の公称応力とひずみの関係

2. 2 疲労試験結果

図-4 に疲労試験結果を示す。疲労寿命はストップホール縁からき裂が 1mm 進展したときの回数である。SH(ICR)の疲労寿命は SH と比較して 3 倍以上向上している。また、導入した試験体 SH(ICR)-OL200 の疲労強度は、SH(ICR)と同程度に、試験体 SH(ICR)-OL300, SH(ICR)-OL400 の疲労強度は SH と同程度となった。

3. 疲労強度の推定

文献 1)より、SH(ICR)においてき裂発生点がストップホール縁である場合、公称応力範囲 $\Delta\sigma_n$ とストップホール縁の応力集中係数 α を用いると、次式によってスリットを閉じた場合の疲労寿命 N が推定できることが示されている。

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

$$\alpha = \frac{\Delta\sigma_H}{\Delta\sigma_n} = \alpha_{bop} \cdot \frac{\sigma_{n,op}}{\sigma_{n,max}} + \alpha_{aop} \cdot \left(1 - \frac{\sigma_{n,op}}{\sigma_{n,max}}\right) \quad (2)$$

ここに、 C および m は材料定数である。 α_{bop} 、 α_{aop} はそれぞれスリット閉開口時の応力集中係数であり、 $\Delta\sigma_{n,max}$ は最大公称応力である。図-6 中に、式(1)より求めた SH の疲労寿命の回帰直線とその回帰直線と式(2)から推定した SH(ICR)および SH(ICR)-OL200 の疲労寿命を示している。SH(ICR)と SH(ICR)-OL200 の疲労寿命の実験値と解析値がよく一致していることがわかる。

このことから、圧縮の過荷重による疲労強度の低下は、過荷重によって $\sigma_{n,op}$ が低下し、式(2)のストップホールの応力集中係数 α が大きくなるためであるといえる。

4. スリット開口時の公称応力の推定

3 で述べたように、過荷重によるスリット開口時の公称応力 $\sigma_{n,op}$ の低下が推定できれば、過荷重による疲労強度の低下を評価することができる。そこで、3 次元弾塑性有限変位解析により、 $\sigma_{n,op}$ を推定する。

解析モデルは、図-2 に示す試験体と同じ寸法とした。鋼部材の材料特性は、ヤング率を 200GPa、ポアソン比を 0.3、構成則をバイリニア型モデルとし、二次勾配はヤング率の 1/100 とした。また、解析では Von Mises の降伏条件と移動硬化則を適用した。ICR 処理によるスリットの接触は、スリット近傍の要素に試験体軸方向および試験体幅方向に熱膨張ひずみを与え、板厚表面から 0~1.5mm のスリット部で接触判定を行う方法で再現した。接触面の法線方向に対しては剛接触とし、向かい合う部材が交差しないようにし、接触面の接線方向に対しては摩擦を考慮していない。

図-5 に $\sigma_{n,op}$ の解析結果を示す。解析値と実験値がよく一致しているので、弾塑性有限変位解析を行うことで、過荷重による疲労強度の低下を概ね評価できると考えられる。

5. 結論

圧縮の過荷重応力が 300, 400MPa の場合は、スリットを閉じたストップホールの疲労強度が普通のストップホールと同程度まで低下しが、圧縮の過荷重が 200MPa の場合は、疲労強度があまり低下しなかった。圧縮の過荷重による疲労強度の低下は、弾塑性有限変位解析をすることで概ね評価できると考えられる。

参考文献

- 1) 松本, 他: 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, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第 68 回全国大会, I-549, 2013.

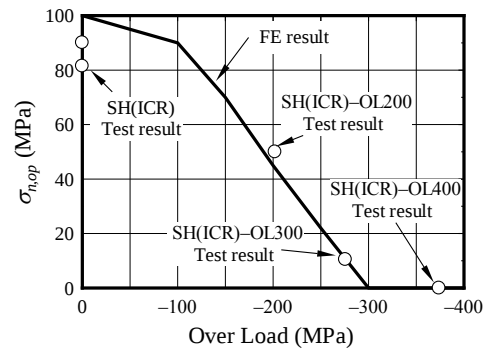


図-5 $\sigma_{n,op}$ の推移

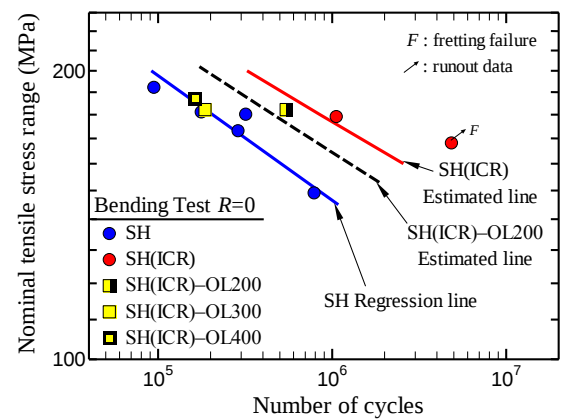


図-6 疲労試験時の公称応力とひずみの関係