A Problem in Crack Growth Arresting by Drilling Stop-Hole

○真壁 朝敏 (琉球大工) 名嘉 海人 (琉球大工) Md Shafiul Ferdous (琉球大院)

Chobin Makabe and Kaito Naka, University of the Ryukyus, 1 Nishihara, Okinawa, 903-0213, Japan

Md Shafiul Ferdous, Graduate school, University of the Ryukyus, 1 Nishihara, Okinawa, 903-0213, Japan

Key words : Fatigue, Crack initiation, Crack growth, Stop-hole, Pin, Bolt, Arresting method

1 結 言

構造物や機器に疲労き裂が発生しても、運用の都合上、すぐに運転を停止し、設備の更新を行うことができない場合がある。そのようなことから、発生したき裂の進展抑制に関する種々の手法が提案されている⁽¹⁾。そのような手法の中で本研究では簡便に実施できるストップホール法について取り組んで検討してみた。ストップホール法は、これまでに改良が進められピンを挿入する手法やボルト締めを行う手法等が提案されている。また、き裂面にパウダーを挿入する手法や多数のボルトでき裂面の開閉を抑える手法もある⁽¹⁾。溶接が施せない状況下では、ストップホール法は有効であると思われる。前報⁽²⁾では、き裂先端にストップホールを加工するのではなく、き裂先端近傍に穴を加工し、その穴にピンを挿入することも有効であることを実験室的なレベルにおいて検討した。本報告においては、比較的に長いき裂が存在する場合のストップホール法の有効性について検討してみた。実用面では、長いき裂に対する進展抑制手法の開発も重要であると思われる。

2 実験方法

用いた材料はアルミニウム合金 2024-T3 および一般構造用圧延鋼材 SS400 である。それぞれの試験片形状の例を図1と図2に示す。なお、アルミニウム合金においては予き裂を発生させ、そのき裂の進展抑制について検討したが、SS400 においては、スリットを試験片に加工し、それを予き裂とみなして実験を行っている。なお、アルミニウム合金は前報⁽²⁾で行った実験結果を用いて再検討したものであり、き裂先端とその近傍に穴加工を施した場合の効果について再考察した。その実験結果を踏まえて、SS400 においては、必ずしもストップホール法が有効とならない場合について、その問題点を示し考察した。

(a) $X=0, 3.2\text{mm}, Y=1.6\text{mm}$ (b) $X=9.2\text{mm}$
Fig. 1 Geometry of the specimen for 2024-T3 ($D=3.2\text{mm}$).

Fig. 2 Geometry of the specimen for SS400 ($D=10\text{mm}$).

疲労試験は電気油圧サーボ式の材料試験機を用いて、主に周波数 10Hz、応力比(繰返し最小応力/最大応力) $R=-1.0$ あるいは $R=-0.33$ で行った。き裂の進展は金属顕微鏡を用いて直接観察し、その長さをダイヤルゲージで測定した。

3 実験結果および考察

3.1 アルミニウム合金 2024-T3 における実験について 後に示す SS400 の実験結果に関連した考察を行うため、アルミニウム合金 2024 の前報⁽²⁾の結果を再掲して紹介する。

図3は図1(a)の試験片で穴位置が $X=3.2\text{mm}$ の場合において、穴にピンを挿入し、疲労試験を行う前に引き抜いたもの

Fig. 3 Observation of crack growth behavior in the case of which pins were pulled before fatigue test.

である。この場合、応力比が-1、応力振幅が 50MPa で実験を行った。応力を 2×10^6 回繰り返しても穴縁（ストップホール先端）からはき裂が発生しなかった。き裂は上下の穴間で停止しているが、ピンの挿入により圧縮の残留応力がき裂進展の抑制に効果がある例になっている。なお、ピンを挿入せずにき裂先端にストップホールのみを加工した場合には、 5.5×10^5 回の応力の繰り返しで試験片が破断している。また、図 1 (b) のようにき裂先端にストップホールを加工した場合はより効果があることがわかっている。そして、実験結果から、き裂先端に加工した穴にピンを挿入した場合はき裂面の開口が抑えられ、ストップホール先端から新たなき裂が発生し難くなる効果があることが考察される。このように、実験室で行った小さな試験片においては、残留応力の効果によってき裂進展が効果的に抑制される場合がある。

3.2 一般構造用圧延鋼材 SS400 における実験について 疲労試験は応力比-0.33 で行っており、繰返し最大応力は 43.4MPa とした。この条件はある自動車生産ラインの設備において発生した構造物の負荷荷重をもとに検討したものである。また、この生産ラインで 1 年間の稼働で約 10^5 回の繰返し荷重が作用するので、その繰返し数を目安にした実験を行っている。

図 2 (b) の中央き裂の場合（中央にスリットを加工した場合）において、ストップホールの先端にピンを挿入した場合において 10^5 回の応力を繰り返した後のストップホール先端の状態を図 4 に示す。先端にき裂が発生していないことが分かる。また、図 2 (c) の両端き裂の場合には、き裂先端にストップホールを加工し、ピンを挿入した場合も挿入しない場合も 10^5 回の応力繰り返しでき裂は発生しなかった。このようにストップホール加工はき裂進展抑制に大きな効果を発揮する場合があります、現場においても有効であることがある。

しかしながら、必ずしもストップホールの加工が有効に作用しない場合があることが図 2 (a) の場合の片側き裂の場合において確認された。この場合、リガメント幅は他の試験片と同じ 75mm とし、試験片板幅 150mm の半分としている。直径 10mm のストップホールはき裂（スリット）先端に加工している。図 5 に示すように、この試験片形状の場合においては、ストップホールにピン（直径が穴径の 1.02 倍）を挿入しても、ほとんど寿命が改善されていないことが分かる。また、ボルト締めストップホール（締め付けトルク 55Nm）ではある程度の効果が得られるが、十分な寿命改善には至らなかった。したがって、このような場合には、本研究で示した手法以外のき裂進展抑制手法を検討する必要がある。

本報告では詳細な説明を省略するが、そのような場合は、先のアルミニウム合金の結果に基づいて検討した結果、き裂面の開口を抑えれば、き裂進展挙動が良好に改善されることがわかっている。そして、次報で詳細に報告する予定であるが、クラックアレスターを用いることも有効であることも分かった（詳細なことは、現在、検討中である）。

図 6 は ANSYS を用いて応力分布等を解析した結果を示している。図 2 (a) の場合は試験片の 1/2、図 2 (b) と (c) の場合は 1/4 の部分において解析を実行した。解析結果は図 2 (a) と (b) の例について示してある。解析結果から図 2 (a) の試験片の場合には他の場合に比べて、ストップホール先端の応力集中度が高いことが分かる（図中の DMX, SMN, SMX はそれぞれ 100 の外力で引っ張った際に生じる最大のき裂開口変位、最小応力、最大応力の値を示している）。そして、特に Fig. 2 (a) の場合、き裂開口変位が他の場合よりも大きくなるのが、ストップホールにピンを挿入してもき裂進展抑制に大きな効果がなかった理由になっていると考察される。

最後に本研究に対してご助言を賜ったトヨタ車体（株）、笠井憲太氏、内田晃治氏そして実験のご助力をいただいた琉球大学大学院生、藤田翔太郎氏に感謝申し上げる。

Fig. 4 Observation of hole edges in the case of Fig. 2 (b)

Fig. 5 Crack growth behavior in the case of Fig. 2 (a).

Fig. 6 Calculations of stress distribution and crack opening displacement

文献

- (1) 例えば、山内・ほか、圧力技術、50 (2012), pp.11-17.
- (2) 伊禮・ほか、材料試験技術、56 (2011), pp.22-30.