異方性を有するアルミニウム薄板中の
疲労き裂進展経路の予測について*萩原 芳彦^{*1}, Shohret DAWULETKELD^{*2}Estimation of the Fatigue Crack Propagation Path
of Anisotropic Aluminum Plate Specimen

Yoshihiko HAGIWARA and Shohret DAWULETKELD

Using the CCT specimen made by an aluminum plate, the effect of anisotropy on the fatigue crack propagation path was investigated, and also the crack propagation path in semicircular notched plate was estimated. The obtained results were as follows. A marked effect of anisotropy appeared in the specimen whose rolling direction was inclined 15 or 30 degrees from the loading direction. Namely, in this case, all the cracks in plate specimens propagate along the rolling direction. However, in the other case, the cracks propagate along the Mode I direction. These results are considered to be based on the effect of Mode II crack propagation. In order to predict the crack propagation path under complicated stress conditions with FEM, the authors assume a condition in which the crack propagates along the rolling direction in the case of $G_{II}/G_I \geq 2.0$ and $G_I > G_{III}$. If the above conditions are not satisfied, the crack propagates along the Mode I or maximum energy release rate direction. This assumption is proved by the crack propagation path of several types of semicircular notched plate specimens.

Key Words: Aluminum, Fatigue Crack Propagation Path, Stress Concentration, Anisotropy, Mixed Mode, Energy Release Rate

1. 結 言

著者らはこれまでに等方性およびわずかな異方性を有する金属材料中を進展する疲労き裂の進展経路を有限要素法を用いて予測する方法を提案し、鉄鋼材料においてその妥当性を明らかにしてきた⁽¹⁾⁽²⁾。

また、これと平行して鋼、アルミニウム、銅などの金属材料中を進展する疲労き裂の進展挙動を実験的にも調べてきた。その結果、純アルミニウム材料の場合、他の材料と比べ疲労き裂進展に対する異方性の現れ方が異なり⁽³⁾、前報の予測法だけでは進展経路を正しく予測できない場合が生ずることもわかった。

そこで、著者らは純アルミニウム材料のように顕著な異方性を有する金属材料の場合にも予測可能な方法を確認するため、前報の予測法に新たな考えを導入したところ実験結果を比較的良好に予測できることがわかった。また、導入した新たな考え方は、純アルミニウム材料に限らず、異方性を有する金属材料全般に適用可能であり、特に応力集中部など、応力が乱れている箇

所を含む実構造部材の寿命予測への適用など、実用的意義もあると考え、ここにその結果を報告する。

2. 実験方法および結果

まず、異方性を顕著に示す純アルミニウム板中の疲労き裂進展挙動の基本特性に関する実験結果について説明する。供試材料は板厚 0.8 mm の A 1100-H 24 アルミニウム薄板で、その機械的性質は縦弾性係数が圧延方向 66.5 GPa、圧延方向と直角方向 72.7 GPa、ポアソン比が 0.34 であり、板のせん断破壊試験によって得られたせん断強度は圧延方向と直角方向の強度が 88 MPa、圧延方向が 92 MPa であった。

試験片形状は図 1 のような中央に長さ 6 mm のスリットを入れた CCT 試験片である。なお、実験では図 1(a) の試験片のほか、本報において提案するき裂進展経路予測法を実証するための試験片として (b)、(c)、(d) に示した 3 種の半円切欠を付けた試験片も用いた。これら 4 種の試験片を以降タイプ A、B、C、D と呼ぶ。なお、圧延方向角度 θ は荷重方向と 0°, 15°, 30°, 45°, 90° の計 5 種類とした。

図 2 はタイプ A 試験片の中央に設けたスリットからの疲労き裂進展経路の結果である。この図からわかるように圧延方向を 15°, 30° としたものの以外は、き裂

* 平成 5 年 10 月 2 日 第 71 期全国大会講演会において講演、原稿受付 平成 5 年 10 月 20 日。

^{*1} 正員、武蔵工業大学工学部 (〒158 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)。

^{*2} 正員、武蔵工業大学大学院。

がほぼモード I 形で進展し、従来から報告されている結果と同様の現象を示した⁽⁴⁾。しかしながら、15°、30°の場合には多くの材料において報告されている結果と異なり圧延方向に沿ってき裂が進展している。

また、図3は上述の試験片におけるき裂進展速度の違いを調べた結果である。なお、この図において、進展速度を求めた際のき裂長さは図中に示す a である。

この結果からもわかるように、圧延方向が15°、30°の場合、他の試験片に比べてき裂が圧延方向に沿い始めるところから進展速度は速くなった。また、45°の場合、進展経路はモード I 形であったが、15°、30°と同じ程度の進展速度を有し、き裂進展速度にも異方性の影響は現れ、特に圧延方向への進展の速度が速くなることがわかった。

本報では上述の圧延方向が荷重荷方向に対して15°、30°の場合のき裂進展経路に現れる特異な挙動を含めて、種々形状下での疲労き裂進展の予測法を提案するものである。

3. き裂進展経路の予測法

き裂進展経路の予測に関してはこれまでにいくつかの研究が報告されている^{(5)~(9)}。しかし、異方性を有する金属材料に対する予測法は著者らが前報において報告した結果以外見かけられない。また、著者らの前報の予測法は異方性の程度が少ない材料に対してのものであり、前述のような純アルミニウムの挙動を予測す

るには不十分であった。

そこで、著者らは前報の考えを発展させ、顕著な異方性を有する材料中のき裂進展のシミュレーション法として以下に述べる方法を提案する。

前述のような現象が生ずる原因としては、本材料の場合圧延方向のせん断強度が他の方向に比べて低いことを考えると、圧延方向へのき裂進展メカニズムとその他の方向への進展のメカニズムが異なることが考えられる。そこで、著者らは Ishikawa により提案されたモード I、II の混合モード状態におけるエネルギー解放率 G_I , G_{II} の分離法⁽¹⁰⁾を著者らのき裂進展経路予測法に適用し、純アルミニウム材料のタイプ A 試験片から得られた結果を用いて種々応力集中部を有する試験片中のき裂進展経路の予測を試み、その妥当性を調べた。

3.1 解析方法 本解析は前報同様仮想き裂進展

図2 き裂進展経路(タイプ A)

図1 試験片形状

図3 き裂進展速度(タイプ A)

法を用い、き裂端の節点 O を微量 Δa ($\Delta a = 10^{-4}$) だけ圧延方向へ移してき裂を進展させる。いま外力 F がき裂長さ a に依存しないと考えると、エネルギー解放率 G は最終的に次式で与えられる。

$$G = - \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} \mathbf{u}_i^T \frac{\Delta \mathbf{K}_i}{\Delta a} \mathbf{u}_i \quad \dots\dots\dots (1)$$

上式は、き裂が Δa だけ進展したときの剛性マトリックスの変化からエネルギー解放率 G が計算できることを示している。 N はき裂端 O まわりに配置した有限要素数、 $\mathbf{u}_i$ 、 $\mathbf{K}_i$ は要素 i の節点変位ベクトルと剛性マトリックスをそれぞれ表す。

本報で提案するき裂進展経路予測法においては前報と異なり混合モード下でのき裂進展に対してモード I、II それぞれの成分の影響を考慮しているため、エネルギー解放率のモード I、II 成分を求める必要がある。

そこで、本報では Ishikawa によって提案された分離法を用いて分離を行った。Ishikawa によれば図 4 に示すようなき裂端付近の点 M の変位 $\mathbf{u}$ は、モード I による変位 $\mathbf{u}^I$ とモード II による変位 $\mathbf{u}^{II}$ に分離できる。

すなわち、図に示すような X 1 軸に関して対称点 M、M' における変位をそれぞれ $\mathbf{u} = \{u_1, u_2\}$ 、 $\mathbf{u}' = \{u'_1, u'_2\}$ とすると、 $\mathbf{u}^I = \{u_1^I, u_2^I\}$ および $\mathbf{u}^{II} = \{u_1^{II}, u_2^{II}\}$ は次のように表せる。

$$\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{u}^I\} + \{\mathbf{u}^{II}\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} u_1^I &= (1/2)(u_1 + u'_1) \\ u_2^I &= (1/2)(u_2 - u'_2) \\ u_1^{II} &= (1/2)(u_1 - u'_1) \\ u_2^{II} &= (1/2)(u_2 + u'_2) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (3)$$

この $\mathbf{u}^I$ 、 $\mathbf{u}^{II}$ を用いるとモード I およびモード II のエネルギー解放率 G_j ($j = \text{I, II}$) は次式で求められる。

$$G_j = - \sum_{i=1}^N \frac{1}{2} (\mathbf{u}_i^j)^T \frac{\Delta \mathbf{K}_i}{\Delta a} \mathbf{u}_i^j \quad (j = \text{I, II}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

本経路予測法は、この分離方法を前報にて述べた異方性材料中のき裂進展経路の予測法に対して適用したものである。すなわち、き裂を仮想的に圧延方向へ一定の長さ進展させ、混合モード下のき裂先端のエネルギー

解放率 G_I 、 G_{II} を求め、その比が 3・2 節に述べる予測法の条件に達したときに圧延方向へ進展し、その他の場合はモード I の方向へ進むものとして経路予測を行った。

3・2 予測方法 上述の解析法によってき裂進展経路を解析するが、進展方向を予測する方法としてモード成分を考慮した基本仮定を設定した。すなわち、き裂は、次の a、b 2 条件が同時に満たされた場合のみ圧延方向へ進展し、その他の場合は前報同様な予測経路をたどり、最大エネルギー解放率を得る方向、すなわち、本研究では繰返し引張片振り状態での実験であるので、おおむねモード I 方向に進展する。

a. 圧延方向にき裂が進んだと仮定したとき計算されるエネルギー解放率の中でモード II 成分のエネルギー解放率 G_{II} がモード I 成分のエネルギー解放率 G_I より十分大きいこと。

なお、本実験の材料の場合には、後に述べるようにタイプ A 試験片に対する実験結果より、限界条件は次の関係とした。

$$G_{II}/G_I \geq 2.0$$

b. 圧延方向にき裂が進んだと仮定したときの G_I の値は後に述べるようにこの材料のモード I 条件下でのき裂進展の下限界における G_I の値 G_{Ith} より大きいこと。すなわち、

$$G_I \geq G_{Ith}$$

であること。

以上の条件によってき裂進展経路は決まるという仮定のもとでタイプ A 試験片のき裂進展結果から種々形状の試験片中を進展するき裂の経路の予測を試みた。

なお、 G_{Ith} の値は本実験でのタイプ A 試験片の結

図 4 き裂端部での座標系

図 5 圧延方向による G_{II}/G_I の変化

果から推定して $G_{Ith}=47.5 \text{ MPa}\cdot\text{mm}$ とした。

また、上に述べた $G_{II}/G_I \geq 2.0$ の条件は以下に述べる方法によって決定した。

図5は図1のタイプA試験片においてき裂が圧延方向である $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ 方向に進展したと仮定したときの G_{II}/G_I の値の変化とき裂長さ a の関係を表している。この図からわかるように、 $45^\circ \sim 90^\circ$ の場合には G_{II}/G_I は1.0以下となる。また、この場合には角度による G_{II}/G_I の値の違いも小さいことがわかった。しかし、き裂が 45° より小さい角度方向へ進展すると仮定した場合には G_{II}/G_I の増加が大きく、モードIIの成分の値が大きくなる。このことは図6に示すよ

図6 圧延方向による G_I, G_{II} の変化

..... experiment
 - - - - - analysis

図7 き裂進展経路(タイプB)

うに単位荷重下でのき裂長さに対する G_I と G_{II} の大きさの変化傾向からもわかる。本実験のタイプA試験片では、 G_{II}/G_I が2.0程度以上になるとき裂が圧延方向に進展していることから前述の条件を設定して進展経路の予測を行った。

4. 実験結果と解析結果の比較

以上の条件のもとでタイプA試験片によって得られた結果から半円切欠きを有するタイプB, C, Dの3種類の試験片中でのき裂進展経路の予測を行った。

図7はタイプBにおけるき裂進展経路を示している。実験結果と予測結果とはすべて同じ方向に進展している。すなわち、圧延方向が $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ の場合、き裂は実験、予測ともに圧延方向へ進展し、 90° の場合はモードI方向へ進展した。ここで、注目すべき点は圧延方向 45° の場合、タイプA試験片(図2)ではモードI方向へ実験結果は進展していたが、切欠きを付けた場合実験、予測とも圧延方向へ進展し、本予測法の妥当性を示す顕著な例となっている。なお、以上の予測においてき裂が圧延方向へ曲がると判定されたとき、き裂をただちに圧延方向へ曲げて予測するのに対して、実験ではいずれの場合にも急激な経路の方向転換が起らず、過渡状態があり、予測より若干遅れる傾向にある。この点はより現実に近い過渡状態を考慮した予測法の改善が今後必要と考えられる。

図8はタイプCの試験片におけるき裂進展経路を示している。まず圧延方向が $30^\circ, 45^\circ, 90^\circ$ の場合、実験、予測ともにき裂はモードI方向へ進展し、正しい

図8 き裂進展経路(タイプC)

予測が可能であることがわかる。特に圧延方向 30° の場合、タイプ A 試験片では圧延方向に実験結果は進展していた(図 2)が、切欠きを付けた場合予測と同じモード I 方向に進展していることは本予測の妥当性を示す顕著な例となっている。

一方、圧延方向 15° の場合、予測では、き裂が両側ともに圧延方向へ進展したのに対し、実験では、き裂が圧延方向へ片方しか進展しなかった。このことは、き裂を圧延方向 15° へ進展するものとして計算した場合、き裂先端のエネルギー解放率成分 G_I が他の圧延方向の試験片と比べ、最も G_{II} に近く、条件の限界にあったことが原因と思われる。図 9 はタイプ D におけるき裂進展経路を示している。実験、予測ともに 15° 、 30° の場合、き裂が圧延方向へ進展し、 45° 、 90° の場合

図 9 き裂進展経路(タイプ D)

図 10 試験片種類による G_{II}/G_I の変化

モード I 方向へ進展した。

さらに、切欠形状が G_{II}/G_I の比に対してどのような影響を与えるかについての検討も行った。図 10 はタイプ A, B, C, D の試験片において、圧延方向が 30° 、円孔の半径 R が 5.0 mm の場合における G_{II}/G_I の比を示している。この図からわかるように、 G_{II}/G_I が試験片ごとの応力集中によって変化し、き裂が圧延方向へ進展しやすい面から見れば、タイプ B, D, A 試験片の順になることが推定できる。

一方、タイプ B の場合、 G_{II}/G_I が 2.0 より小さいため、図 8 に示すように大部分のき裂が圧延方向に進展しなかったことも確認できる。

また、タイプ B の試験片において圧延方向が 45° の場合に対し、円孔の半径 R を変えて G_{II}/G_I の比を求めたところ、図 11 に示すような結果が得られた。この図からわかるように、 G_{II}/G_I が半径 R によって変化し、 R の値が大きいくほど、 G_{II}/G_I が大きくなり、上述の図 5 はこの比が 2.0 を越えているため圧延方向へ進展し、タイプ A 試験片の場合(図 2)は $R=0$ となり 2.0 以下となるので、圧延方向に進展しなかったことも確認できる。

5. 結 論

顕著な異方性を有する金属材料中を進展する疲労き裂の経路予測法を提案し、応力集中部を有する純アルミニウム材料中を進展するき裂の経路をスリットのみ有し応力集中部を有さない試験片によって得られた結果を用いて予測したところ、予測可能であることがわかった。その要点を以下に示す。

(1) 本実験で用いた純アルミニウム材料の応力集中を有さずスリットのみ付した試験片の場合、圧延方

図 11 応力集中による G_{II}/G_I の変化

向が荷重方向と $15^\circ \sim 30^\circ$ 傾いているときにき裂は圧延方向に沿って進展した。

(2) き裂がモード I 方向以外の圧延方向へ進展する条件として G_{II}/G_I の値が大きく影響することがわかり、本実験材料の場合その条件はほぼ $G_{II}/G_I \geq 2.0$ であることがわかった。

(3) (2)の条件が満たされていても圧延方向の G_I の値がモード I での下限界値 G_{Ith} より小さくなるときき裂は圧延方向には進展せず、モード I 方向へ進展する。

(4) 上記(2), (3)の条件以外の場合にはき裂は前報にて提案した最大エネルギー解放率をとる方向に進展する。

文 献

- (1) 萩原・Shohret, D.・渋谷・星野, 機論, 57-539, A(1991), 64.
- (2) Hagiwara, Y. and Shohret, D., *Proc. of The Thirty-fifth Japan Congress on Materials Research*, (1992), 63.
- (3) 萩原・Shohret, D.・福岡, 第37回日本学術会議材料研究連合講演会, (1993-9), 205.
- (4) 大路・ほか4名, 機論, 45-390, A(1979), 117.
- (5) Hellen, T. K., *Int. J. Num. Meth. Eng.*, 9(1975), 187-207.
- (6) 宮本・福田・ほか2名, 機論, 43-375, A(1977), 3970.
- (7) 村上, 機論, 46-407, A(1979), 729.
- (8) 角, 造論, 156(1984), 533.
- (9) 藤原・宮園・福田, 機論, 52-481, A(1986), 2139.
- (10) Ishikawa, H., *Int. J. Fract.*, 16(1980), R243.