繰返し曲げによる非貫通疲労き裂の進展*

小寺 沢 良 一** 南 坂 繁***

Propagation of Part-through Cracks by Alternating Bending Stresses

by

Ryoichi KOTERAZAWA and Sigeru MINAMISAKA

(Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka)

Experiments were conducted on the propagation of part-through cracks (semi-elliptical surface cracks) by alternating bending stresses with sheet specimens of an aluminum alloy (2017-T3). Crack closure levels were determined by means of the compliance method as well as by the surface observation. The propagation rate of part-through cracks could not be correlated with that of through-thickness cracks in terms of the stress intensity, but it could be in terms of the effective stress intensity based on closure measurements by the compliance method. The effective stress intensity based on closure measurements by the surface observation was applicable neither to crack propagation in the interior nor to that on the surface of specimens.

(Received Dec. 20, 1976)

1 緒 言

貫通疲労き裂の進展速度 dl/dN と応力拡大係数幅 ΔK との間に、次式の関係があることがよく知られている。

$$\frac{dl}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (A, m \text{ は定数}) \quad (1)$$

この関係が非貫通き裂にも適用できるかどうかという問題に関しては、ここ数年来かなりの研究結果が報告されてきているが、いまだ明確な解答は得られていない。一方、Elberによりはじめて取り上げられた crack closure に関する研究が盛んに行われ、crack closure level 以上の有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} がき裂進展を支配する重要なパラメータであることが明らかにされてきている。本研究では、非貫通き裂の進展特性を明確にするために、crack closure 現象に着目し、非貫通き裂（半円状表面き裂）を有する板の面外曲げ（平面曲げ）および片側貫通き裂を有する板の面内曲げの疲労試験を行い、その結果を比較検討した。

2 実験方法

試験材料は市販の 2017-T3 アルミニウム合金板材（厚さ 4 mm）で、その化学成分および機械的性質を Table I, II に示す。試験機は 4 kgm シェンク式疲労試験機を用い、Fig. 1 に示す貫通き裂および非貫通

Table I. Chemical composition of test material.

Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Al
4.20	0.52	0.31	0.58	0.66	0.24	0.041	Bal.

(%)

Table II. Mechanical properties of test material.

Tensile strength	Yield strength	Elongation
46.0 kg/mm ²	30.9 kg/mm ²	22.0%

(a) Through-thickness crack (TTC)
(b) Part-through crack (PTC)

Fig. 1. Test specimens.

* 原稿受理 昭和51年12月20日
** 正 会 員 大阪大学基礎工学部 豊中市待兼山町
*** 学生会員 大阪大学基礎工学部 豊中市待兼山町

き裂試験片（き裂を観察する表面は、#2 000 エメリーペーパーで研摩後、パフ仕上げ）により、貫通き裂の実験は面内曲げ一定振幅荷重、非貫通き裂の実験は平面曲げ二段多重重複荷重下で行った。非貫通き裂試験の場合、小さい方の荷重振幅ではき裂の進展量は小さく、Fig. 2 のように破面には半円状の貝殻模様が観察される。この貝殻模様と、接眼移動測微計付顕微鏡により測定した表面でのき裂長さから、内部のき裂進展速度を求め、またこれを用いて応力拡大係数の計算を行った。また破面の微視的観察を走査電子顕微鏡（日立-明石 MSM-2 型）により行った。

Fig. 2. An example of fracture surface of PTC ($R=0$, $\Delta\sigma=18 \text{ kg/mm}^2$). Arrows indicate direction of crack propagation.

Crack closure の測定には、コンプライアンス法²⁰⁾と表面の写真撮影による方法¹⁹⁾の2種の方法を採用した。コンプライアンス法では、試験片背面中央（ノッチを加工した位置の反対側）に抵抗線ひずみゲージを貼り、そのひずみと試験機付属のダイヤルゲージを読んで得られる荷重との関係から、crack opening level を定めた。Fig. 3 に荷重-ひずみ線図の例を示す。この図で、荷重を負荷していくときに、線図のこう配が一定になる点（き裂が完全に開口したとき—図中矢印）の荷重を crack opening level とした。また、試験片平行部のき裂から充分離れた位置に抵抗線ひずみゲージを貼り、そのひずみを荷重信号としてシンクロスコープ縦軸に、試験片背面中央のひずみゲージからの信号を横軸に入力して、試験機の運転中の荷重-ひずみ線図をも得た。Fig. 4 はその一例である。表面の写真撮

*1 理論上は、き裂前縁上の最後に開く位置での opening level が得られ、本実験では、最後に開く位置は表面であるから、表面の opening level と一致するように思われる。しかし、実際には、測定精度の問題が入ってくるので、ひずみゲージに最も近い位置にウェイトのかかった内部の平均値が得られるものと考えられ、表面の測定値と一致しない (Fig. 9)。

*2 Fig. 3 と 4 では荷重速度が異なっているので、この例のように必ずしも同様の曲線にならない。また、Fig. 4 の場合には、増幅回路の応答特性のため、真の荷重-ひずみの曲線を与えていない可能性がある。しかし (ΔK_{eff}) の算出に必要なき裂開口比 U については両者はほぼ一致しており (Fig. 9)、本研究の議論の範囲内では差支えないものと考えられる。このような事情を考慮して、以下では、主として静的測定 (Fig. 3) の結果を基とし、動的測定 (Fig. 4) の結果を参考にして議論している

Fig. 3. Examples of static load versus strain at the back surface of specimen curve.

Fig. 4. An example of dynamic load versus strain at the back surface of specimen curve. (TTC, $R=-1$, $\Delta\sigma=10 \text{ kg/mm}^2$)

影による方法においては、荷重を段階的に負荷しながら、表面のき裂先端付近の開口状態を光学顕微鏡によって、Fig. 5 のように写真撮影し、そのネガティブフィルムを万能投影器に写し出して、A, B, C, D の各点でき裂の開口量を測定し、荷重と開口量の関係 (Fig. 6 (a)) を求めた。これから、コンプライアンス法の場合と同様にして、A, B, C, D 点各点での opening level (図中矢印) を定め、これを Fig. 6 (b) のようにき裂先端へ外挿して、き裂先端の crack opening level を求めた。以上のようにして得られる crack opening level から、き裂開口比

$$U = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\text{open}}}{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}} \quad (2)$$

を求め、これから有効応力拡大係数幅を次式により計算した。

$$\Delta K_{\text{eff}} = U \Delta K \quad (3)$$

貫通き裂の応力拡大係数は次式²¹⁾によった。

$$K = \sigma \sqrt{\pi l} \left[1.122 - 1.40 \left(\frac{l}{D} \right) + 7.33 \left(\frac{l}{D} \right)^2 - 13.08 \left(\frac{l}{D} \right)^3 + 14.0 \left(\frac{l}{D} \right)^4 \right] \quad (4)$$

ここに l はき裂長さ、 D は試験片の平行部幅を示す。非貫通き裂の応力拡大係数については、 $\beta=30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ (Fig. 2 参照) の場合には別報²²⁾の Shah・Kobaya-

Fig. 5. Optical micrographs in the vicinity of a crack tip (PTC, $R=0$, $\Delta\sigma=18 \text{ kg/mm}^2$).

shi の方法を²³⁾修正した方法により計算し、 $\beta=0^\circ$ (表面方向) については、この方法の精度が悪いので、Grandt・Sinclair の計算²⁴⁾を採用した。

3 実験結果とその検討

3・1 非貫通き裂と貫通き裂の比較

貫通き裂および非貫通き裂の進展速度と応力拡大係数との関係を Fig. 7 および 8 に、crack closure の測定結果 (き裂開口比) を Fig. 9 および 10 に示す。応力拡大係数幅 ΔK で整理した Fig. 7 (a) (貫通き裂) および Fig. 8 (a) (非貫通き裂) においては、それぞれ応力比依存性がみられると同時に、Fig. 8 (a) の非貫通き裂の結果を同図中に直線で記入した貫通き裂の結果と比較すると、応力拡大係数幅 ΔK 、応力比 R が同一でも、き裂進展速度は $R=-1$ および 0 の場合につ

(a) Relation between crack growth rate and stress intensity range
(b) Relation between crack growth rate and effective stress intensity range

Fig. 7. Crack propagation data for TTC.

Fig. 6. Extrapolation of the crack opening level at the surface.

いては異っており、この種の整理によっては、一般には貫通き裂の進展速度から非貫通き裂の進展速度を推定できないことを示している。

Fig. 9 は crack closure の測定結果の例を示したものである。Fig. 9 (a) は、貫通き裂の結果で、横軸には最大応力拡大係数 $K_{\max}$ をとっている。Fig. 9 (b) は非貫通き裂の結果で、この場合 $K_{\max}$ はき裂前縁に沿って一定でないので、横軸には便宜上試験片表面でのき裂長さをとっている。Fig. 3 に例示した静的荷重-ひずみ線図から得られるき裂開口比 (static) と、Fig. 4 に例示した動的荷重-ひずみ線図から得られるき裂開口比 (dynamic) とは一致している。これに対して、

Fig. 8. Crack propagation data for PTC.

Fig. 9. Comparison of crack opening ratios obtained by different methods.

Fig. 10. Crack opening ratios for TTC and PTC.

表面における写真撮影により得られたき裂開口比と、コンプライアンス法により得たき裂開口比とは著しく異っている。前者は試験片の表面層のき裂開口比であって、き裂進展は試験片内部の開口比の平均値を与える後者と関係すると考えられるので、本節では後者を基にして議論し、次節で前者との比較検討を行うこととする。

Fig. 10 はコンプライアンス法により得られたき裂開口比をまとめて、き裂進展速度に対し図示したもの

*3 Fig. 9 に示した誤差範囲はき裂先端に近い点のデータから定めた概略の範囲である。例えば Fig. 6 (b) の場合、き裂先端の crack opening level は A 点より低く B 点より高い範囲にあると考えると、A-B をき裂開口比の誤差範囲とした。

である。応力比 R が 0.4 以上では、貫通き裂、非貫通き裂のいずれの場合にもき裂開口比 $U=1$ で、応力拡大係数幅 ΔK のすべてが有効である。応力比 $R=-1$ (両振り) の場合の非貫通き裂のき裂開口比は $U=0.5$ で、き裂は最も単純に考えられるように荷重零で開口し、 ΔK の 1/2 が有効である。その他の場合には、 $R=0$ では $U<1$, $R=-1$ では $U<0.5$ で、き裂はある正の荷重で開口し、 ΔK もしくは $\Delta K/2$ の一部しか有効でない。

貫通き裂と非貫通き裂の比較に関して、Fig. 10 のき裂開口比の測定結果において注目すべきことは、 $R=-1$ および 0 において、両者の開口比が異なっていることであって、これが Fig. 8 (a) にみられた $R=-1$ および 0 の場合の両者のき裂進展速度の相違の主要な原因と考えられる。実際、この開口比を用いて算出した有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} を用いて Fig. 7 (a) および 8 (a) の結果を整理すると、Fig. 7 (b), 8 (b) に示し

*4 非貫通き裂の場合には、き裂前縁に沿ってき裂進展速度は一定ではないが、き裂開口比は前縁に沿った平均的な値と考えられるコンプライアンス法による値を採用しているため、き裂進展速度についてもき裂前縁の平均的な値と考えられる $\beta=30^\circ$ における値をとっている。

*5 非貫通き裂の場合、き裂前縁に沿ってき裂開口比は必ずしも一定ではないが、ここでは、き裂前縁の平均的な値と考えられるコンプライアンス法によるき裂開口比 U を、き裂前縁の各点の応力拡大係数幅 ΔK にかけて、有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} を算出した。

たように進展速度の差は著しく減少する。すなわち、貫通き裂に関する Fig. 7 (b)では、よく知られているように、応力比依存性が著しく減少し、すべての実験点が破線で示した狭い範囲内に入っており、非貫通き裂に関する Fig. 8 (b)では、応力比依存性が貫通き裂の場合と同様に減少すると同時に、破線で示した貫通き裂の実験点の範囲ともほぼ一致している。なお、表面 ($\beta=0^\circ$) の比較的進展速度が高い領域では、 ΔK_{eff} で整理しても、貫通き裂と非貫通き裂の結果がくい違っているが、このことについては次節で述べる。

西岡, 平川の報告³⁾¹⁰⁾によれば、非貫通き裂(半だ円表面き裂)を有する板が繰返し引張荷重を受ける場合、初期にはき裂縦横比 a/b の値が変化しながら進展し、その進展速度と応力拡大係数幅との関係は貫通き裂のそれと対応しないが、その後 a/b の値はほぼ定常値 ($a/b \approx 0.8$) となり、両者は対応するようになる。非貫通き裂(半だ円表面き裂)を有する板が繰返し曲げを受ける場合には、 a/b の値は定常とならず、き裂進展速度と応力拡大係数幅との関係は、貫通き裂のそれと対応していない。これらの結果は、 a/b の比が非定常の場合には、 ΔK を用いるかぎり、非貫通き裂の進展速度は貫通き裂のそれから推定できないことを示唆している。Fig. 11 に示すように、本実験の場合も a/b の比は一定ではなくき裂とともに変化しており、

Fig. 11. Crack aspect ratios of PTC.

西岡らの結果と一致している。したがって、本実験結果において、き裂進展速度を ΔK_{eff} で整理すると貫通き裂と非貫通き裂の間の近似的な対応関係が得られたことは、両者間の crack closure level の相違が、 a/b の比が非定常の場合に ΔK によっては進展速度の対応が得られないことの主要な原因であることを示唆している。

き裂縦横比 a/b が変化しながら進展する場合に、非貫通き裂の crack opening level が貫通き裂の場合と異なる理由に関しては、貫通き裂の場合、あるいは非貫通き裂がき裂縦横比 a/b 、一定の状態では進展する場合は、応力拡大係数はき裂前縁に沿って一定(もしくはほぼ一定)であるが、非貫通き裂の a/b が変化しながら進展する場合には、一定でないことと関係があるの

ではないかと思われる。すなわち、crack opening level は、き裂先端部の塑性域とその周囲の弾性域との相互作用により定まると考えられるから、き裂前縁上の一点における応力拡大係数値のみによっては定まらず、その周辺の部分の応力状態の影響をも受けると考えられる。したがって、き裂前縁に沿って応力拡大係数値が一定でない非定常縦横比の非貫通き裂の場合の crack opening level は、単純に貫通き裂の場合と一致する結果とはならず、本実験のような結果になったことが考えられる。これに関するさらに詳しい検討は今後の課題としたい。

3・2 試験片表面における開閉挙動とき裂進展の関係

前節の議論は、試験片内部全体の平均的値を与えるものとして、コンプライアンス法により得られた

Fig. 12. Relation between crack growth rate and effective stress intensity range derived from surface measurements.

Fig. 13. A fractograph in the vicinity of the surface of specimen. ($R=0.4$, $\Delta\sigma=18$ kg/mm², $b=2.68$ mm, $da/dN=0.05$ μ/c)

crack opening level をもとにして行ったが、前述のように、表面の写真撮影による測定結果はコンプライアンス法による結果と著しく異っており、表面の opening level の方がコンプライアンス法による内部のそれより高い。非貫通き裂の試験片表面 ($\beta=0^\circ$) における進展速度は、表面の crack opening level から計算される有効応力拡大係数幅で整理した方が一見合理的と思われるが、表面と内部の crack opening level が異なる結果として、そのような整理を行うと、Fig. 12 に示すように貫通き裂の進展速度と著しく相違する。^{*6}

Fig. 13 は、非貫通き裂の表面付近を走査電顕で観察したものである。内部の破面は比較的平坦でプラトーが明りょうであるが、表面付近では内部と異り、凹凸がはげしくプラトーが不明りょうである。表面の写真撮影により観察された挙動は、このような表面層の挙動と考えられる。この層の幅はき裂進展速度が増すにつれて大きくなり、進展速度の大きい領域では、巨視的にみても識別できるようになる。非貫通き裂の進展速度をコンプライアンス法による有効応力拡大係数幅 ΔK_{eff} で整理した Fig. 8 (b)において、表面 ($\beta=0^\circ$) における進展速度は、速度の大きい領域 ($dI/dN > 0.05 \mu/c$) では、貫通き裂の結果の範囲と大きくずれていたが、これは、表面層が大きくなったために、表面層の開閉挙動が表面の進展速度に影響を及ぼしているためと思われる。実際、Fig. 12 に示した表面における opening level による ΔK_{eff} で整理した結果は、この領域で貫通き裂の進展速度に接近する傾向にある。また、Fig. 8 (b)および 12 において、表面層が巨視的に見えはじめるき裂進展速度を矢印で示しているが、それぞれ貫通き裂の進展速度とくい違いはじめる点、もしくは接近しはじめる点に近い位置にある。き裂進展速度が小さく表面層が小さい場合には、その開閉挙動は表面付近全体の進展速度にはほとんど影響せず、表面の進展速度も、コンプライアンス法による ΔK_{eff} によって、貫通き裂の結果とよく対応するものと考えられる。

試料表面に opening level の高い層があって、内部ではその表面層より opening level が低いということ^{7)20)25)~27)}については、最近数例の測定結果が報告されている。また、表面と内部での進展特性の相違、破面形態の相違²⁸⁾²⁹⁾³⁰⁾なども報告されており、表面における観察結果が内部の状態と異なることの多いことはよく知られている事実であるが、本研究の結果で注意したいのは、“表面における”き裂進展速度が“表面における”opening

level から得た ΔK_{eff} と対応せず、内部における平均的な opening level から得られた ΔK_{eff} と対応したという点である。これは表面層のき裂は内部のき裂に引張られて進展することを示しており、また、“表面における”観察結果は“表面における”き裂進展の支配的因子に対する情報すらも与えないことがあることを意味している。本実験の場合、試験片表面には加工層があるため、その影響が考えられるが、観察された“表面層”はき裂進展速度によりその厚さが変化しているところから、上述の結果は加工層のみがその原因とは考え難く、加工層がない場合にも、定性的には同様の現象が現れるのではないかと思われる。また本実験はき裂進展速度が比較的高く、塑性域の大きい領域に限られているので、低伝ば速度域については今後の検討が必要である。このように、今後の検討に待つところが多いが、表面における観察結果をもとにして議論する場合の一つの問題点を示唆しているものと考ええる。

4 結 言

2017-T3アルミニウム合金について、crack closure 現象に注目して、非貫通き裂と貫通き裂の繰返し曲げによる進展挙動を、進展速度の比較的大きい範囲において調べた結果、次の結論を得た。

- (1) き裂進展速度を応力拡大係数幅で整理した場合には、応力比が同じであっても、貫通き裂と非貫通き裂は、一般には対応しなかった。
- (2) き裂進展速度を、コンプライアンス法により求めた crack opening level から得られた有効応力拡大係数幅で整理すると、応力比の値に関係なく、貫通き裂と非貫通き裂が対応した。
- (3) 表面観察により得られた crack opening level は、コンプライアンス法によるそれとは著しく異り、前者から求めた有効応力拡大係数幅によっては、貫通き裂と非貫通き裂の良好な対応は得られなかった。また破面観察の結果は、表面層における破面様相が内部と著しく相違しており、crack closure の測定結果と対応していた。

終りに、本研究に協力された大阪大学大学院基礎工学研究科学生、大橋喜法氏および実験当時同基礎工学部学生であった米田安孝氏に謝意を表する。

(昭和51年5月20日 日本材料学会第25期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 金沢 武, 町田 進, 糸賀興右, 日本造船学会論文集, No. 132, 395 (1972).
- 2) Härkegård, G., Engg, Fracture Mechanics, 6, 795 (1974).
- 3) 西岡邦夫, 平川賢爾, 鉄と鋼講演論文集, 60, S・542 (1974).

*6 この整理では、貫通き裂については、コンプライアンス法による ΔK_{eff} を用いているが、貫通き裂についても表面のき裂開口比から得られる ΔK_{eff} を用いた場合、その値は $6 \text{ kg/mm}^{3/2}$ 以下 (図の左方枠外) になり、この場合も非貫通き裂の進展速度と対応しない。

- 4) 矢田敏雄, 酒井啓一, 上村 武, 飯野 暢, 日本造船学会論文集, No. 135, 357 (1974).
- 5) 真谷捷郎, 牛島正夫, 今村成雄, 阪井大輔, 平田隆明, 日本造船学会論文集, No. 136, 267 (1974).
- 6) 笠井憲一, 小林英男, 日本機械学会講演論文集, No. 740-10, 211 (1974).
- 7) 榎本邦夫, 宇佐美三郎, 日本機械学会講演論文集, No. 740-10, 231 (1974).
- 8) Madox, S. J., Int. J. of Fracture, **11**, 221 (1975).
- 9) 藤井英輔, 林 慎也, 飯田國廣, 日本溶接学会誌, **44**, 627 (1975).
- 10) 西岡邦夫, 平川賢爾, 北浦幾嗣, 日本材料強度学会講演論文集, 69 (1975).
- 11) Nagai, A., M. Toyosada, and T. Okamoto, Engg. Fracture Mechanics, **7**, 481 (1975).
- 12) 松尾政弘, 土田栄一郎, 小林英男, 小玉正雄, 日本機械学会講演論文集, No. 760-13, 261 (1976).
- 13) 井野幸雄, 岩城秀夫, 新井淳一, 日本機械学会講演論文集, No. 760-2, 169 (1976).
- 14) Elber, W., ASTM STP **486**, 230 (1971).
- 15) Adams, N. J. I., Engg. Fracture Mechanics, **4**, 543 (1972).
- 16) Schmidt, R. A., and P. C. Paris, ASTM STP, **536**, 79 (1973).
- 17) Lindley, T. C., and C. E. Richards, Proc. of Conf. on Mechanisms of Crack Growth, Cambridge, 184 (1973).
- 18) Shih, T. T., and R. P. Wei, Engg. Fracture Mechanics, **6**, 19 (1974).
- 19) 西谷弘信, 高尾健一, 材料, **23**, 69 (1974).
- 20) 菊川 真, 城野政弘, 田中健一, 高谷 勝, 材料, **25**, 899 (1976).
- 21) "The Stress Analysis of Cracks Handbook", edited by Tada, H., P. Paris, G. Irwin (1973).
- 22) 小寺沢良一, 南坂 繁, 材料, **26**, 915 (1977).
- 23) Shah, R. C., and A. S. Kobayashi, ASTM STP, **513**, 3 (1972).
- 24) Grandt, A. F. Jr., and G. M. Sinclair, ASTM STP, **513**, 37 (1972).
- 25) Pitoniak, F. J., A. F. Grandt, L. T. Montulli, and P. F. Packman, Engg. Fracture Mechanics, **6**, 663 (1974).
- 26) Irving, P. E., J. L. Robinson, C. J. Beevers, Int. J. of Fracture, **11**, 1055 (1975).
- 27) 田中正清, 橘内良雄, 長屋雅人, 日本機械学会講演論文集, No. 760-13, 180 (1976).
- 28) Hagiwara, Y., T. Yoshino, and T. Kunio, The 19th Jap. Conf. on Mat. Research, Metallic Mat., 22 (1976).
- 29) Koterazawa, R., M. Mori, T. Matui, and D. Shimo, Trans. ASME, Ser. H, No. 4, 202 (1973).
- 30) 増田千利, 西島 敏, 日本機械学会講演論文集, No. 760-13, 219 (1976).