回転曲げと平面曲げにおけるき裂伝ば速度の 差異とそれらの簡便な評価法*

皮籠石 紀雄^{*1}, 西谷 弘 信^{*2}, 後藤 真 宏^{*3}
王 習 術^{*4}, 田中 秀 穂^{*1}

Unified Evaluation of Fatigue Crack Growth Rates under Rotating Bending and Plane Bending

Norio KAWAGOISHI, Hironobu NISITANI, Masahiro GOTO,
Xishu WANG and Hideho TANAKA

Fatigue strength under plane bending is higher than that under rotating bending at the same stress. This is due to the difference in the crack growth rates. In the present study, rotating bending and plane bending fatigue tests of an annealed 0.42% carbon steel were carried out on smooth specimens and specimens with a small blind hole in order to investigate the difference in the crack growth rates, and a unified evaluation method for crack growth rates in the two types of loading was proposed. The crack growth rate is expressed by the small crack growth law based on the nominal stress amplitude σ , $dl/dN = C\sigma^n l$, in each type of loading, while the constants C and n differ in these types of loading. However, the crack growth rates in both cases can be expressed by the same small crack growth law based on the plastic strain amplitude ϵ_p , $dl/dN = C'\epsilon_p^{n'} l$ (C' and n' are constants in both types of loading). Consequently, fatigue lives in both types of loading can be predicted using the former expression, the small crack growth law based on the plastic strain amplitude, and the cyclic stress strain curve in each type of loading.

Key Words: Fatigue, Carbon Steel, Rotating Bending, Plane Bending, Small Crack, Small Crack Growth Law, Cyclic Stress Strain Curve

1. 緒 言

公称応力に基づく $S-N$ 曲線で比較した場合, 等しい応力下における平滑材の疲労寿命は, 負荷形式や試験片断面形状により異なる^{(1)~(6)}.

著者らは先に, 負荷応力が等しい場合の回転曲げと平面曲げにおける平滑材の疲労寿命の相違を, 疲労寿命のほとんどが微小き裂の伝ば寿命で占められることを根拠に, 高応力下の伝ばに対して有効な次に示す微小き裂伝ば則に基づき検討した⁽⁶⁾.

$$dl/dN = C_1 \sigma^n l \dots\dots\dots (1)$$

そしてき裂伝ば速度は, 回転曲げより平面曲げのほうが小さくなること, またそのおもな理由は両負荷形式における試験片表面の塑性ひずみ差であり, それに加えて試験片が回転するか否かにより生じるき裂面の置かれた状態の相違より説明できることを明らかにした. そして個々の負荷形式でのき裂伝ば速度は, 微小き裂伝ば則で整理されることを示した. しかしながら,

両負荷形式間のき裂伝ば速度の相違を定量的に評価するまでには至らなかった.

そこで本研究では, 平滑試験片と小穴付試験片を用いて回転曲げおよび平面曲げ疲労試験を行い, 両負荷形式における疲労寿命の差のおもな原因がき裂伝ば速度の相違であり, それは負荷形式の相違により生じる塑性ひずみの差に起因していることを考慮して, き裂伝ば速度に及ぼす負荷形式の影響を塑性ひずみに基づく微小き裂伝ば則により検討した.

2. 材料, 試験片および実験方法

実験に用いた材料は, S45C圧延丸棒(直径19 mm)である. その化学成分を表1に示す. 素材に, 840°C, 1 hの焼なましを行ってから試験片を製作した. 表2に熱処理後の機械的性質を示す.

図1に試験片の形状および寸法を示す. 回転曲げと平面曲げのいずれの試験片とも同一断面寸法を有するものである. 応力振幅 全ひずみ振幅曲線は, 図1(a), (b)に示す平滑材を用いて求めた. また疲労き裂伝ば速度の測定には, 主として平滑材中央に図1(c)に示す小穴を加工した小穴材を用いたが, 一部(d)に示す部分切欠きを加工した部分切欠材も用いた. 試験片は, 機械加工後すべて600°C, 1 hのひずみ除去のための

* 原稿受付 1995年10月23日.

^{*1} 正員, 鹿児島大学工学部 (〒890 鹿児島市郡元1-21-40).

^{*2} 正員, 九州産業大学工学部 (〒813 福岡市東区松香台2-3-1).

^{*3} 正員, 大分大学工学部 (〒870-11 大分市大字田野原700).

^{*4} 学生員, 鹿児島大学大学院.

焼なましを行い、さらに電解研磨により表面を約20 μm 除去してから実験に供した。

応力振幅-全ひずみ振幅曲線は、上記の機械加工、熱処理および表面仕上処理を行った試験片の表面にひずみゲージ(ゲージ長さ0.3 mm)を貼付け、定応力振幅下のひずみを測定して求めた。その際の応力振幅-全ひずみ振幅関係は、5~8 応力レベルで求めたが、一応力ごとに1本の試験片を用いて測定した。

なお、以下で述べる応力は、塑性変形が生じないとしたときの公称応力(小穴材の場合小穴は無視する)であり、応力、ひずみともに試験片表面における値である。また、応力振幅および応力幅はそれぞれ σ , $\Delta\sigma$ で、全ひずみ振幅および塑性ひずみ振幅はそれぞれ ε_t , ε_p , $\Delta\varepsilon$ で表示する。

応力拡大係数幅は Raju Newman の式⁽⁸⁾ で計算した。

き裂長さの測定はレプリカ法で行い、その際のき裂長さは試験片表面に沿う円周方向長さ(小穴材の場合、小穴径0.3 mm も含む)で定義した。

使用した試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機(容

量100 N・m、回転数約50 Hz)および曲げねじり疲労試験機(容量 ± 50 N・m、繰返し速度約33 Hz)であり、いずれも定荷重方式、応力比 $R = -1$ で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 き裂伝ば速度に及ぼす負荷形式の影響 図2は、両負荷形式における小穴材の $S-N$ 曲線である。等しい応力下での疲労寿命は、回転曲げより平面曲げのほうが長いが、その差は応力レベルの低下に伴い減少する。

図3に両負荷形式における部分切欠材のき裂伝ば曲線を示す。 $\ln l$ と N/N_f の関係に負荷形式による相違はほとんど見られない。また全寿命のほとんどがき裂

Fig. 2 $S-N$ curves of specimen with a small blind hole

Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

Fig. 3 Crack growth curves of specimen with a partial notch

伝ば寿命である。したがって、 $S-N$ 曲線で認められた両負荷形式間の寿命差は、主としてき裂伝ば速度の差に起因していると言える。

ところで、両負荷形式間におけるき裂伝ばの速度差が表面のき裂長さのみで評価できるためには、き裂面の形状が等しくなければならない。図4に小穴材を用いて求めたき裂面の形状の変化を示す。図4からわかるように、負荷形式の相違によるき裂面形状への影響はほとんど認められない。

図5に小穴材におけるき裂伝ば曲線を示す。き裂伝ば速度は平面曲げより回転曲げのほうが大きく、応力レベルの低下に伴いその差は減少する。また、 $\ln l$ と N/N_0 の関係はき裂長さが小さいところでは直線で近似され、き裂伝ば速度はき裂長さに比例することがわかる。

図6に、き裂伝ば速度と応力拡大係数幅 ΔK の関係を示す。負荷形式の差はもとより、応力依存性もあり、応力拡大係数は有効でない。これは、負荷応力が降伏応力の6割以上と高く、塑性変形が無視できない⁽⁹⁾ことに起因している。

図7は、等しい応力下でき裂長さが約1 mm になっ

たときのき裂先端付近の表面写真である。き裂先端付近のすべりは、き裂伝ば速度の遅い平面曲げのほうが少ない。また、き裂から離れた部分に注目すると、回転曲げの場合、全面にわたってかなり一様にすべりが観察されるのに対し、平面曲げの場合、き裂から離れた部分のすべりはき裂近傍に比べ極端に少ない。このことに関して、平滑材の回転曲げでは微視き裂の発生は多く、結果としてき裂の合体頻度も高くなる。これは、最大応力を受ける領域が、回転曲げの場合全周であるのに対し、平面曲げの場合一部に限られるためである⁽⁴⁾。

そこで以下では、上記の結果を考慮して表面の塑性ひずみでき裂伝ば速度を整理する。

Fig. 6 Relationship between crack growth rate and stress intensity factor range

Fig. 4 Aspect ratio

Fig. 5 Crack growth curves of specimen with a small blind hole

Fig. 7 Slip bands around crack ($\sigma = 320$ MPa, $l \approx 1.0$ mm)

図8は、両負荷形式で求めた応力振幅 σ と全ひずみ振幅 ϵ_t の関係である。等しい応力下で比較した場合、平面曲げより回転曲げのほうが塑性ひずみは大きい。

一般に、応力振幅 σ と塑性ひずみ振幅 ϵ_p の関係は次式で表示される。

$$\sigma = k\epsilon_p^m \quad \text{.....(2)}$$

ここで、 k は繰返し硬化係数であり、 m は指数である。

図9は図8に基づいて、応力振幅と塑性ひずみ振幅の関係を求めたものである。本実験における式(2)の定数は、回転曲げの場合 $k \approx 1.4 \times 10^3$ 、 $m \approx 0.21$ 、平面曲げの場合 $k \approx 2.1 \times 10^3$ 、 $m \approx 0.25$ である。以下、塑性ひずみ振幅は応力振幅から式(2)を用いて求めた。

図10にき裂伝ば速度の塑性ひずみ振幅依存性を示す。いずれの負荷形式でも、き裂伝ば速度と塑性ひずみ振幅の両対数関係は直線で近似される($dl/dN \propto \epsilon_p^{n'}$)。このことと前述のき裂伝ば速度のき裂長さ依存性から、き裂伝ば速度は $\epsilon_p^{n'}/l$ で整理されることになる。

Fig. 8 Relationship between stress amplitude and total strain amplitude

Fig. 9 Relationship between stress amplitude and plastic strain amplitude

図11にき裂伝ば速度と $\epsilon_p^{n'}/l$ の関係を示す。図11からわかるように、 $\epsilon_p^{n'}/l$ で整理した場合、負荷形式の違いによるき裂伝ば速度の差はほとんど認められない。すなわち式(3)が成立する。

$$dl/dN = C_2 \epsilon_p^{n'}/l \quad (n' = 1.85) \quad \text{.....(3)}$$

以上のように $\epsilon_p^{n'}/l$ は、負荷形式に関係なくき裂伝ば速度を決定する有用なパラメータである。しかしながら、ひずみを求めるのは一般的には簡単ではない。これに対し応力は、容易に求めることができるので実用性を考慮した場合、応力による表示が都合がよい。

図12は、き裂伝ば速度を、応力で表示した微小き裂伝ば則で整理したものである。いずれの負荷形式でもき裂伝ば速度は σ^n/l で一義的に決まるが、式(1)における定数 C 、 n は負荷形式により異なる。

そこで以下では、式(1)と式(3)の有効性を考慮し

Fig. 10 Relationship between crack growth rate and plastic strain

Fig. 11 Relationship between crack growth rate and $\epsilon_p^{1.85}/l$

Fig. 12 Relationship between crack growth rate and $\sigma \sqrt{a}$

た両負荷形式におけるき裂伝ば速度および疲労寿命の簡便な推定法を検討する。

3・2 平滑材の疲労寿命の予測法 著者らは、多くの材料を用いて回転曲げ疲労試験を行い、任意寸法をもつ平滑丸棒試験片の疲労寿命は、式(1)から導かれる次式で求められることを示した⁽¹⁰⁾。

$$N_f = \{\ln \alpha + 6\} / C_1 \sigma^n \dots \dots \dots (4)$$

ここで、 α は直径5 mmの試験片に対する対象試験片の寸法との相似比である。この関係は、両負荷形式間で、 $\ln 1/N_f$ 関係およびき裂面形状がほぼ等しいことから、平面曲げでも同様に成立するものと考えられる。そこで、式(1)、(2)および式(4)の関係を用いて、両負荷形式における平滑試験片[図1(a)、(b)]の疲労寿命を推定した。

すなわち、回転曲げに対する式(1)と両負荷形式に対する式(2)を実測することにより、式(3)の関係から平面曲げに対する式(1)、(4)が求められる。

図13に、両負荷形式における平滑材の疲労寿命の予測値と実測値の比較を示す。予測寿命は実測値とよく一致している。

以上の結果は、異なる負荷形式であっても、応力振幅と塑性ひずみ振幅の関係が得られれば、データの豊富な回転曲げ試験の結果から、微小き裂伝ば則式(1)と式(3)を通じて、任意の負荷形式でのき裂伝ば速度したがって疲労寿命が予測できることを意味している。

4. 結 論

円形断面をもつ平滑試験片および小穴付試験片を用いて回転曲げおよび平面曲げ疲労試験を行い、両負荷形式間に生じるき裂伝ば速度の相違の物理的意味と両

Fig. 13 Prediction of fatigue life of smooth specimen

者におけるき裂伝ば速度の統一的評価法について検討した。

得られた結論を要約すると以下のようになる。

(1) 等しい応力下における疲労寿命は、回転曲げより平面曲げのほうが大きい。

(2) いずれの負荷形式でもき裂伝ば速度は、公称応力基準の微小き裂伝ば則[式(1)]で表示できる。しかしながら、定数 C_1 , n は負荷形式により異なる。

(3) 式(1)を、両負荷形式における応力振幅・塑性ひずみ振幅曲線から得られる塑性ひずみ振幅を用いて塑性ひずみ基準の微小き裂伝ば則[式(3)]に書き換えれば、負荷形式に関係なくき裂伝ば速度は一義的に決まる。

(4) 回転曲げに対する公称応力で表示した微小き裂伝ば則[式(1)]と両負荷形式における応力振幅・塑性ひずみ振幅曲線から、それぞれの負荷形式におけるき裂伝ば速度さらには疲労寿命が推定できる。

文 献

- (1) Forrest, P.G. and Tapsell, H.J., *Engineering*, **173** (1952), 757-758.
- (2) Mansson, S.S., *Exp. Mech.*, **5**(1965), 193-199.
- (3) 中村宏・ほか3名, *材料*, **27** 299(1978), 721-727.
- (4) 鎌田敬雄, *材料*, **29** 317(1980), 150-154.
- (5) 小川壽・幡中憲治, *機論*, **55** 513, A(1989), 1088-1094.
- (6) 西谷弘信・ほか2名, *材料*, **33** 366(1984), 311-316.
- (7) Nisitani, H. (Mura, T.編), *Mechanics of Fatigue AMD*, **47**(1981), 151-166, ASME.
- (8) Raju, I.S. and Newman, J.C. Jr., *Eng. Fract. Mech.*, **11** (1977), 817-829.
- (9) 西谷弘信・皮龍石紀雄, *機論*, **51** 471, A(1985), 2560-2563.
- (10) Nisitani, H., ほか2名, *Eng. Fract. Mech.*, **41**(1992), 499-513.