回転曲げ疲労下における鋼の寿命解析*

小 川 壽^{*1}, 幡 中 憲 治^{*2}

An Analysis of Fatigue Life under Rotation Bending in Steels

Hisashi OGAWA and Kenji HATANAKA

The lives required for crack initiation and crack growth should be separately dealt with in fatigue life prediction. The crack growth life estimated on the basis of the da/dN - $\Delta K\epsilon$ relationship exhibits a steeper slope on the $\log \Delta\epsilon/2$ - $\log N_p$ diagram than that in the experiment, where da/dN and $\Delta K\epsilon$ are crack growth rate and strain intensity factor range, and N_p is life required for crack growth. The da/dN - $\Delta K\sigma$ and da/dN - $\Delta K\epsilon$ relationships show the stress dependency, unless crack closure is considered, where the strain intensity factor range is denoted as $\Delta K\epsilon$. This, however, disappears in the da/dN - $E\Delta K\epsilon_{eff}$ relationship where $\Delta K\epsilon_{eff}$ is the effective strain intensity factor range. Furthermore, the crack growth life curve determined from the da/dN - $E\Delta K\epsilon_{eff}$ relationship agrees well with the test data. The crack-initiation-to-final-failure-life ratio shows the stress dependency, ranging from 0.4 to 0.6, in the high-cycle-fatigue region under rotation bending. Consequently, we can predict the $E\Delta\epsilon/2$ - N_f curve by combining the stress dependency of the crack initiation life and the da/dN - $E\Delta K\epsilon_{eff}$ relationship under rotation bending.

Key Words: Crack Propagation, Fracture Mechanics, Steel, Rotating Bending Fatigue, Life Estimation, Surface Crack Growth, Crack Initiation Life, Effective Strain Intensity Factor Range

1. 結 言

合理的な疲労寿命予測は、き裂発生までの寿命評価とき裂進展速度の破壊力学的解析に基づいたき裂伝ば寿命評価を併せ行うことにより実現される。疲労き裂進展速度の破壊力学的解析についてはこれまで多くの報告がなされており、この中には微小疲労き裂の成長の問題を取扱ったものも少なからず含まれている^{(1)~(4)}。著者らは前報⁽⁵⁾において高強度・低延性鋼(SNCM 439)および低強度・高延性鋼(S15CK)について回転曲げ疲労下の表面き裂伝ば速度、 da/dN を破壊力学的に解析し、この結果に基づいて疲労寿命を算出した。そして、両対数グラフ上にプロットしたひずみ振幅、 $\Delta\epsilon$ と疲労寿命、 N_f の関係における時間強度域のこの配が実験結果よりも計算結果において大きくなることを報告した。本研究の目的は回転曲げ下の全疲労寿命をき裂発生寿命とき裂伝ば寿命に分け、それぞれがこの現象に与える影響を詳細に検討することにある。その際、同一負荷で多くの試験片について実験

を行い、実験誤差に起因するあいまいさをできるかぎり排除するよう努めた。

2. 試 験 方 法

2.1 試験片 実験に使用した材料は JIS S45C 鋼で、これに 850°C で 30 分間の焼なましを施した後、供試材とした。材料の機械的性質を表 1 に示す。機械加工により試験片を作成し、これに電解研磨を施した後、試験に供した。なお、試験片は最小直径 $\phi 7.5$ mm の砂時計形を有し、その中央部に深さ 50 μ m の浅い切欠きを付したものである。試験には小野式回転曲げ疲労試験機 (98 N·m) を用いた。

2.2 き裂長さの測定 いかなる繰返し数間隔、 ΔN ごとにき裂長さ、 l を測定するかはき裂進展速度の測定結果に少なからず影響を与える。本研究において採用したき裂長さ測定間隔を表 2 に示す。なお、き裂長さの測定精度は 5 μ m である。

表 1 試験片の機械的性質

Material	Yield stress, MPa	Ultimate strength, MPa	Elongation, %	Reduction of area, %
S 45C	424	695	28.0	32.2

* 平成元年 11 月 21 日 九州支部・中国四国支部合同長崎地方講演会において講演、原稿受付 平成 2 年 11 月 2 日。

*¹ 正員、宇部工業高等専門学校 (〒755 宇部市常盤台)。

*² 正員、山口大学工学部 (〒755 宇部市常盤台)。

表 2 き裂進展速度を得るためのき裂長さの測定方法

Stress amplitude $\Delta\sigma/2$, MPa	290 and 310			325 and 340		
Crack length l , μm	$1 \leq 500$	$500 < l \leq 1000$	$l > 1000$	$1 \leq 500$	$500 < l \leq 1000$	$l > 1000$
Cyclic number interval for crack length measurement $\Delta N (\times 10^4)$	5	2	1	2.5	2	1

図 1 S-N 曲線

3. 実験結果および考察

3・1 S-N 曲線 本実験では応力レベルを 4 段階に変え、各応力下で 15 本ずつの試験片について疲労試験を実施し、疲労き裂伝ば速度を測定した。浅い切欠部で破断した試験片数の全破断試験片数に対する割合は 34/70 であり、疲労強度に及ぼす切欠きの影響は小さいと考えられる。本実験において得られた S-N 曲線を図 1 に示す。連続運転による試験結果を●印で、また、き裂長さを測定するため適宜試験を中断した場合の 15 本の試験片に関する試験結果の平均値を○印で示してある。また、対数正規分布を仮定した場合、この平均値を中心とした $-2\sigma \sim +2\sigma$ の寿命範囲を細線で示した。ただし、 σ は標準偏差である。

3・2 き裂伝ば速度の整理 図 2 には応力振幅、 $\Delta\sigma/2=290$ MPa および 325 MPa においてそれぞれ 15 本ずつの試験片により得られた深さ方向に対するき裂伝ば速度、 da/dN と応力拡大係数幅、 $\Delta K\sigma$ の関係がプロットしてある。なお、応力拡大係数、 $K\sigma$ は Raju-Newman の式⁽⁶⁾を用い、アスペクト比、 $\lambda=0.76$ として算出した。また、き裂進展速度の測定に際し対象としたき裂長さは $20 \mu\text{m} \sim 2 \text{mm}$ であり、き裂は応力繰返し中閉口しないとした。図 2 より明らかなように、寸法の大きいき裂におけるほど、 $\log da/dN - \log$

図 2 応力拡大係数幅によるき裂伝ば速度の整理

$\Delta K\sigma$ 関係に生じるばらつきが小さくなる。

四つの応力振幅に対し 15 本ずつの試験片を用い、き裂伝ば速度、 da/dN と応力拡大係数幅、 $\Delta K\sigma$ 、ひずみ拡大係数幅、 $\Delta K\epsilon$ およびき裂開閉口を考慮して算出した有効ひずみ拡大係数幅、 $\Delta K\epsilon_{\text{eff}}$ との関係求めた。この 15 本の試験片より得られた $da/dN - \Delta K\sigma$ 、 $da/dN - E\Delta K\epsilon$ および $da/dN - E\Delta K\epsilon_{\text{eff}}$ 関係の平均値を各応力振幅ごとにプロットした結果を図 3 に示した。ただし、 $\Delta K\epsilon_{\text{eff}}$ の算出については後述する。この図によると、 $da/dN - \Delta K\sigma$ 関係は応力依存性を示し、応力が高いほど、高き裂伝ば速度側に位置する。また、そのこう配は応力が高いほど小さい。き裂伝ば速度を $E\Delta K\epsilon$ によって整理した場合においてもやはり応力依存性が生じている。しかし、 $da/dN - \Delta K\epsilon$ 関係の応力依存性は $da/dN - \Delta K\sigma$ 関係におけるそれより小さい。なお、両対数グラフ上にプロットされた $da/dN - \Delta K\epsilon$ 関係のこう配は $da/dN - \Delta K\sigma$ 関係のそれとほぼ同じである。また、それらのこう配は破線で示されている CCT 試験片におけるこう配と異なっており、両者は互いに交叉する。

ところで、Starkey ら⁽⁷⁾は有効ひずみ拡大係数幅、 $\Delta K\epsilon_{\text{eff}}$ の算出式として次式を提案している。

$$\Delta K \epsilon_{\text{eff}} = \Delta \epsilon_{\text{eff}} \sqrt{\pi a} \cdot F \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\Delta \epsilon_{\text{eff}} = (q \Delta \epsilon_e + \Delta \epsilon_p) \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 E はヤング率、 $\Delta \epsilon_{\text{eff}}$ は有効ひずみ幅、 F は応力拡大係数の形状補正係数、 $\Delta \epsilon_e$ および $\Delta \epsilon_p$ は弾性および塑性ひずみ幅である。図4は引張圧縮下の振幅変動法により求めた繰返し応力-ひずみ曲線と回転曲げ疲労試験中に測定された応力-ひずみ関係を示す。 $\Delta \epsilon_e$ と $\Delta \epsilon_p$ は回転曲げ疲労試験中試験片表面に生じる全ひずみ幅を測定し、これをこの図の実線で与えられる引張圧縮疲労試験より決定された繰返し応力-ひずみ曲線上にこの値をプロットすることにより得られた。なお、 q はき裂開口を表現するための係数であり、ここでは城野らの S35C 材に関する実験結果⁽⁶⁾ を引用

し、これを次のように近似した。

$$q = A + B \cdot 1 (1 \leq 0.9 \text{ mm}) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$q = 0.5 (1 > 0.9 \text{ mm}) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ただし、

$$A = 0.8, B = -0.33$$

である。図3によると、 $\log da/dN - \log E \Delta K \epsilon_{\text{eff}}$ 関係においては応力依存性はほとんど消失し、また、そのこの配は CTT 試験片における $da/dN - \Delta K \sigma$ 関係のそれとほぼ一致する。

3.3 き裂発生寿命とき裂発生時のき裂長さの推定

き裂が最初に発見された時の繰返し数、 N_i は全寿命のうちのかかなり大きい部分を占める、ところでどの寸法のき裂の生成をもってき裂発生とみなすかの決定は困難である。測定されたき裂のうち最小の寸法のき裂の生成時をき裂発生時期とする考え方もあろう。図5は最小き裂長さの累積確率分布を示している。この図によると最小き裂長さは $10 \sim 45 \mu\text{m}$ の間でばらつき、しかも負荷された応力振幅が高いほど最小き裂長さは大きくなる傾向にある。それゆえ、最小き裂長さをき裂発生の基準に取ることは必ずしも妥当ではない。そこで、き裂進展曲線の平滑化を行い、実験より得られたき裂発生時のき裂長さとき裂発生寿命の関係と平滑されたそれらの関係を比較することにより適切なき裂発生時におけるき裂長さおよびき裂発生寿命を求めることにした。

N_i および l_i を測定されたき裂発生寿命およびき裂発生時のき裂長さ、 N_0 および l_0 を平滑されたき裂発生寿命およびき裂発生時のき裂長さとする。まず、き裂伝ば則より

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)^m \quad \dots\dots\dots (5)$$

を得る。ただし、

図3 各破壊力学的パラメータによるき裂伝ば速度の整理

図4 引張圧縮および回転曲げ下における応力-ひずみ関係

図5 き裂発生時のき裂長さの確率分布

$$\Delta K = (\Delta K\sigma, \text{ or } E\Delta K\epsilon, \text{ or } E\Delta K\epsilon_{\text{eff}})$$

である。表面き裂のアスペクト比を $\lambda = a/(1/2)$, (a : き裂深さ, l : 表面におけるき裂長さ) とすると, き裂が微小き裂長さ l_0 から長さ l に成長するのに要する繰返し数, N_p は

$$N_p = \frac{1}{(\lambda/2)^{(m/2)-1} \cdot C (\Delta S \sqrt{\pi} \cdot F)^m \{1 - (m/2)\}} \times [1^{1-(m/2)}]_{l_0}^{l_1} \quad (6)$$

で与えられる。ただし,

$$\Delta S = (\Delta\sigma, \text{ or } E\Delta\epsilon, \text{ or } E\Delta\epsilon_{\text{eff}})$$

F は応力拡大係数の補正係数である。

$$B = (\lambda/2)^{m/2-1} \cdot C (\Delta S \sqrt{\pi} \cdot F)^m \{1 - (m/2)\} \quad (7)$$

と置くと

$$l^{1-(m/2)} - l_0^{1-(m/2)} = B \cdot N_p \quad (8)$$

となる。そこで今, ある繰返し数間隔 ΔN ごとに n 回き裂長さ, l を測定する。その任意の K 番め ($K=1, 2, \dots, n$) に測定されたき裂長さに関するデータに対し

$$Y_k = l_k^{1-(m/2)}, X_k = N_{i,k} + N_{p,k}, g = l_0^{1-(m/2)} \quad (9)$$

図 6 き裂長さとき裂伝ば繰返し数の関係

図 7 き裂発生寿命の実験値と補正值の比較

と置くと,

$$Y_k = B \cdot X_k + g \quad (10)$$

となる。 B は式(7)より既知であるから g を未知数とする最小二乗方程式の解は

$$g = \frac{1}{n} \left(\sum_{k=1}^n Y_k - B \sum_{k=1}^n X_k \right) \quad (11)$$

で与えられる。 N_i 時における平滑されたき裂長さ, l_0 はこの g を用いて式(9)より得られる。次に, 測定されたき裂発生時のき裂長さ, l_i における平滑されたき裂発生寿命は

$$N_0 = N_i + \Delta X \\ = N_i + \frac{\Delta Y}{B} \quad (12)$$

となる。ただし, ΔY および ΔX は, き裂発生時のき裂長さとき裂発生寿命に関する実測値と, データを平滑化することにより得られたこれらの値との差である。式(9)~(12)の関係は図6に図式化して示した。

図7はき裂長さが20 μm , 30 μm および50 μm における寿命の実験値(そのき裂長さが測定されていない場合, その前後のき裂長さとその時の繰返し数を比例配分することにより上記長さのき裂に対する寿命を定めた)と式(12)より計算された, 20 μm , 30 μm および50 μm のき裂長さに対するき裂発生寿命, N_0 を比較したものである。横軸にき裂発生寿命の誤差[式(12)による計算値, N_0 と実験値, N_i の差を N_0 で無次元化したもの]を示し, 縦軸は各データの誤差をマイナス側よりプラス側に順次プロットしたものである。 $l_i = 20 \mu\text{m}$ の場合, N_0 と N_i の差に関するデータはマイナス側に偏在しており, 計算より得られたき裂発生寿命より実験により得られたき裂発生寿命のほうが大きくなる傾向にある。一方, $l_i = 30 \mu\text{m}$ および $l_i = 50 \mu\text{m}$ の場合には両者間の差に関するデータは0を中心にマ

図 8 き裂発生寿命比

ナス側とプラス側にはほぼ均等に配置されている。このことはき裂長さ、 $l_i=30\mu\text{m}$ 未満の寸法のき裂の伝ば速度は式(5)で示されるき裂伝ば則に従っていないことを示唆している。したがって、 $l_i<30\mu\text{m}$ のき裂長さ域のき裂の成長を式(6)によるき裂伝ば寿命の計算に含めると、き裂伝ば寿命を大きく見積もる結果になる。

3・4 破断寿命に対するき裂発生寿命の割合 図8は各応力におけるき裂発生寿命の破断寿命に対する割合を示したものである。ここで、 l_i の値として $30\mu\text{m}$ のほかは $50\mu\text{m}$ および $100\mu\text{m}$ を採用してある。き裂長さ $30\mu\text{m}$ に対するき裂発生寿命比、 $\alpha=N_i/N_f$ は $\Delta\sigma/2=290\sim 340\text{MPa}$ の条件下で $0.4\sim 0.6$ である。その上限、 $\alpha=0.6$ および下限、 $\alpha=0.4$ はそれぞれ、応力振幅の下限、 $\Delta\sigma/2=290\text{MPa}$ およびその上限、 $\Delta\sigma/2=340\text{MPa}$ の試験条件下で生じ、これらの場合の破断寿命はそれぞれ $N_f=1.67N_p$ および $N_f=2.50N_p$ となる。したがって、四つの応力レベルのき裂発生寿命比の平均値、 $\alpha\approx 0.5$ に対しき裂発生寿命の応力依存性が破断寿命に与える影響は、 $-17\sim +25\%$ となる。また、 50 および $100\mu\text{m}$ について、それは、それぞれ、 $-9\sim 12\%$ 程度である。

3・5 き裂伝ば寿命 図9は図3の結果に基づきき裂伝ば寿命を算出した結果である。実線は図3の4本の実線より平均的 $da/dN-\Delta K\sigma$ 、 $da/dN-E\Delta K\epsilon$ および $da/dN-E\Delta K\epsilon_{eff}$ 関係を求め、これに基づき式(6)より算出したき裂伝ば寿命曲線である。き裂発生時の

き裂長さ、 l_i については $3\cdot 3$ で $1\geq 30\mu\text{m}$ とすべき結論を得たので、 $l_i=30\mu\text{m}$ として計算した。また、最終き裂長さ、 l_f は 2mm とした。○および●印は各応力下でのき裂伝ば寿命に関する実験値および図3に示された各応力に対する $da/dN-\Delta K\sigma$ 、 $da/dN-E\Delta K\epsilon$ および $da/dN-E\Delta K\epsilon_{eff}$ 関係より得られたき裂伝ば寿命に関する計算結果を示す。また、破線はCTT試験片より得られたき裂伝ば則に基づくき裂伝ば寿命の計算結果を示したものである。図3における各破壊力学パラメータとき裂伝ば速度の関係に生じる応力依存性が、実験結果と実線で表された計算結果との差を生じさせている。ところで、 $da/dN-E\Delta K\epsilon_{eff}$ 関係に基づいて算出されたき裂伝ば寿命曲線は実験結果と良く一致している。

3・6 全疲労寿命の算出 全疲労寿命、 N_f はき裂発生寿命比、 α とき裂伝ば寿命、 N_p とから

(a)

図9 き裂伝ば寿命の応力依存性

(b)

図10 き裂発生寿命と各破壊力学パラメータより算出されたき裂伝ば寿命を用いて導出された全疲労寿命と実験結果との比較

$$N_f = 1/(1-\alpha) \cdot N_p \dots\dots\dots (13)$$

で与えられる。図8および、図9の結果に基づき、 $\alpha = 0.5$ (一定) とし、式(13)より算出した全疲労寿命曲線を図10に示す。(a)は四つの応力レベルで得られた $\log da/dN - \log \Delta K\sigma$ 関係を平均し、これらより算出された $\Delta\sigma/2 - N_f$ 曲線である。また、(b)は同様にそれぞれ四つの応力レベルで得られた $\log da/dN - \log E\Delta K\epsilon$ および $\log da/dN - \log E\Delta K\epsilon_{eff}$ 関係を平均し、これらより得られた $E\Delta\epsilon/2 - N_f$ 曲線である。このようにして得られた $\Delta\sigma/2 - \log N_f$ および $E\Delta\epsilon/2 - \log N_f$ 関係のこの配は実験結果のそれより大きい。

次に、き裂発生寿命、 N_i の応力依存性を考慮し、図8より $l_i = 30 \mu m$ に関して次式を得た。

$$\alpha = -0.34 \times 10^{-3} \cdot \Delta\sigma/2 + 1.56 \dots\dots\dots (14)$$

この結果と、四つの応力レベルに関する $da/dN - E\Delta K\epsilon_{eff}$ 関係の平均値より算出した N_p とを用いて導出した全疲労寿命曲線が図10(b)中、破線で与えられている。破線は実験結果と良く一致している。このように、き裂発生寿命の応力依存性とき裂開閉口を考慮することにより良好な疲労寿命予測を行うことができる。

4. 結 論

回転曲げ疲労寿命を破壊力学的手法を用いて検討した。その結果は次のようにまとめられる。

(1) き裂発生寿命、 N_i は応力依存性を示し、き裂発生時のき裂長さを $l_i = 30 \mu m$ とした場合、 $\Delta\sigma/2 = 290 \text{ MPa} \sim 340 \text{ MPa}$ の試験条件下でき裂発生寿命比、 N_i/N_f は $0.6 \sim 0.4$ となる。

(2) き裂発生時のき裂長さ、 l_i について統計的検討を加え、 $l_i \geq 30 \mu m$ とするのが妥当であることを示した。

(3) き裂伝ば速度、 da/dN とき裂開閉口を考慮せずに算出された応力拡大係数幅、 $\Delta K\sigma$ およびひずみ拡大係数幅 $\Delta K\epsilon$ の関係は応力依存性を示す。しかし、 da/dN をき裂開閉口を考慮して算出した有効ひずみ拡大係数幅、 $\Delta K\epsilon_{eff}$ に対してプロットした結果においては応力依存性が消失した。また、この結果に基づいてき裂伝ば寿命を予測した結果は実験結果と良く一致した。

(4) $da/dN - \Delta K\sigma$ および $da/dN - E\Delta K\epsilon$ 関係に基づいて算出した $\Delta\sigma/2 - \log N_f$ 曲線および $E\Delta\epsilon/2 - \log N_f$ 曲線の時間強度域のこの配と実験によるそれとの相違は、き裂発生寿命の応力依存性、および $da/dN - \Delta K\sigma$ と $da/dN - E\Delta K\epsilon$ 関係の応力依存性に起因する。

文 献

- (1) Dowling, N. E., *ASTM STP*, 637(1977), 97.
- (2) Kitagawa, H., Takahashi, S., Suh, C. M. and Miyashita, S., *ASTM STP*, 687(1976), 420.
- (3) Nakai, Y. and Tanaka, K., *Proc. 23rd Jap. Cong. Mater. Res.*, (1980), 106.
- (4) Usami, S., Fukuda, Y. and Shida, S., *ASME Paper*, 83-PVP, (1983), 97.
- (5) 小川・幡中, 機論, 55-513, A, (1989), 1088.
- (6) Raju, I. S. and Newman, J. C. Jr., *Eng. Fract. Mech.*, 11(1977), 817.
- (7) Starkey, M. S. and Skelton, R. P., *Fatigue Eng. Mater. Struct.*, 5(1982), 327.
- (8) 城野・宋・山・西垣内・岡部・菊川, 機論, 51-467, A(1985), 1677.