炭素鋼平滑材のねじり疲労における $S-N$ 曲線と
微小き裂伝ば則との関係*西谷 弘 信^{*1}, 福田 孝 之^{*2}Relation between $S-N$ Curve and Small-Crack Growth Law in Torsional
Fatigue of Annealed Carbon Steel Plain Specimens

Hironobu NISITANI and Takayuki FUKUDA

Torsional fatigue tests were carried out on plain specimens and specimens with a small hole, made of annealed carbon steels (S 20 C and S 45 C). The relations between the logarithm of the crack length and the cycle ratio (N/N_f , N : number of cycles, N_f : fatigue life) are expressed by the curve convex upward in the torsional fatigue and the curve concave upward in the rotating bending fatigue. The crack propagation in the torsional fatigue is of the Mode II-type in an initial stage and Mode I in the latter stage. The dependency of $1/N_f$ on stress amplitude τ_a in the torsional fatigue is nearly the same as the dependency of the crack growth rate on τ_a .

Key Words: Fatigue, Torsional Fatigue, Annealed Carbon Steel, $S-N$ Curve, Small-Crack Growth Law, Yield Stress, Crack Propagation, Fatigue Life

1. 緒 言

一般に部材の全疲労寿命の中でき裂伝ば寿命の占める割合は大きく、またき裂伝ば寿命の中では微小表面き裂の伝ば寿命が支配的である。したがって、これまでも $S-N$ 曲線と微小き裂伝ば則との関係については、多くの研究が発表されている⁽¹⁾。そして、引張圧縮および回転曲げ疲労試験における $S-N$ 曲線と微小き裂伝ば則との間に密接な関係があることが明らかにされ、微小き裂伝ば則から $S-N$ 曲線を導く方法も提案されている⁽²⁾。しかし、ねじり疲労についてはそのような研究は少ない⁽³⁾。

本研究では以上のことを考慮し、ねじり疲労における $S-N$ 曲線と微小き裂伝ば則との関係について S20C および S45C 焼なまし材を用いて検討した。S20C と S45C を用いたのは、疲労限度と降伏応力との比が大きい材料と小さい材料を比較するためである。また合わせて同一形状試験片の回転曲げ疲労試験も行い、曲げとねじりの特徴を比較検討した。

2. 使用材料、試験片および実験方法

素材は市販の S20 C および S 45 C 圧延丸棒 ($\phi 22$ mm) で表 1 に素材の化学成分を示す。素材はそれぞれ 890°C および 845°C で 1 時間焼なましした後機械加工した。表 2 に焼なまし材の機械的性質を示す。なお結晶粒径は、S 20 C が約 20 μm 、S 45 C が約 10 μm である。

試験部分の形状は図 1、2 に示すようにねじりと回転曲げで同一とした。その応力集中係数 K_t は 1 に近く、ねじりで 1.004、曲げで 1.007 であり⁽⁴⁾、実質的には平滑材とみなせる。機械加工後表面を約 20 μm 電解研磨により除去し、小穴材は電解研磨後試験片の最小

表 1 化学成分 (%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
S20C	0.21	0.21	0.47	0.014	0.017	0.21	0.06	0.09
S45C	0.44	0.20	0.69	0.009	0.009	0.07	0.04	0.05

表 2 機械的性質

	σ_s	σ_B	σ_T	ϕ
S20C	276	469	864	58.7
S45C	335	569	1061	57.2

σ_s : Lower yield stress MPa, σ_T : True fracture strength MPa
 σ_B : Ultimate tensile strength MPa, ϕ : Reduction of area %

* 昭和 63 年 11 月 17 日 第 954 回講演会において講演、原稿受付 昭和 63 年 4 月 26 日。

*¹ 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*² 正員、佐世保工業高等専門学校 (〒857-11 佐世保市沖新町 1-1)。

断面部に図3に示す小穴をドリルによりあけた。最後に650°Cで1時間真空焼なましを行い実験に供した。

用いた試験機はシェンク形ねじり疲労試験機(容量40 N・m, 回転数3 600 r. p. m.)と小野式回転曲げ疲労試験機(容量15 N・m, 回転数3 000 r. p. m.)である。

表面き裂の観察はレプリカ法により光学顕微鏡(×100~×400)を用いて行った。また応力は、小穴の存在を無視したときの試験片最小断面部の弾性計算による最大応力を用いた。

3. 実験結果および考察

炭素鋼の引張圧縮および回転曲げ疲労試験の S-N 曲線は一般に

$$\sigma_a N_f = \text{一定} \quad (1)$$

(σ_a : 応力振幅, N_f : 破断繰返し数, k : 常数)

の関係で表され, そのときのき裂伝ば則が次式で表されることがこれまでの研究⁽²⁾⁽⁵⁾で明らかにされている。

$$dl/dN = C_1 \sigma_a^k l \quad (2)$$

(dl/dN : き裂伝ば速度, C_1, n : 常数, l : き裂長さ)

そして式(1)と式(2)の指数 k, n の間に $k \cong n$ の関係があり, その値は部材によって異なり, 焼なまし材では6~10である⁽¹⁾⁽⁶⁾。

ねじりも応力状態が軸と45°方向の引張圧縮として考えることができるため, 上式の適用が予想される。したがって以下この点に注目し考察する。

3.1 S 20 C のねじり疲労

3.1.1 S-N 曲線 図4に S 20 C 平滑材のねじり疲労の S-N 曲線を示す。小穴材については, 穴縁の影響がなくなるき裂長さ(0.5 mm)**1から破断までの寿命, すなわちき裂伝ば寿命 $N_{0.5-f}$ をとっている(以下同様)。図の中で一点鎖線は, 最大せん断応力説に従

図1 ねじり疲労試験片

図2 回転曲げ疲労試験片

図3 小穴形状

うせん断降伏応力($\tau_{sl} = \sigma_{sl}/2$)を示す。

図より平滑材のねじり疲労における式(1)の指数は $k \cong 17$ と, 回転曲げ疲労など($k \cong 8$)に比べ非常に大きいことがわかる。またき裂の起点を限定した小穴材の伝ば寿命についてもほぼ同様で $k \cong 16$ と非常に大きい。これは平滑材の疲労限度が降伏応力付近にあり, 実験した応力がすべて降伏応力以上であるためと考えられる。実際にねじりの繰返しヒステリシスループの幅は, 降伏応力以上では弾性域に比べ, わずかな応力上昇で大きく増加することが認められる⁽⁷⁾。すなわちこの場合, 応力レベルのわずかな増加がひずみ幅の大きな増加を招き, それがき裂伝ば速度の応力依存性を大きくしているものと思われる。以上のことを考慮すれば, 降伏応力以下で破断するときには, ねじり疲労でも回転曲げ等と同様の S-N 曲線が得られることが予想される。ここには示していないが, $\phi 0.5$ mm 小穴材により疲労限度を下げ, 降伏応力以下で破断させると $k \cong 9$ となり回転曲げ等と類似の結果が得られた。また別の原因として, 降伏応力以上では多くのき裂がほぼ同時に発生するためその合体により高応力ほど寿命が短くなることも考えられるが, これはき裂の起点を限定した小穴材の実験結果が平滑材とほぼ同じになることから関係ないことがわかる。

3.1.2 き裂伝ば 図5にねじり疲労における平滑材および小穴材のき裂の伝ば状況を示す。平滑材のき裂伝ばは軸方向(モード II)に始まり, 途中で軸と45°方向(モード I)に遷移する(このモード II から I への遷移が起こる点を以下では遷移点と呼ぶ)。したがって平滑材と小穴材では伝ば過程が多少異なる。図は S 45 C のものであるが S 20 C についてもほぼ同じである。

図6に S 20 C の平滑材および小穴材のき裂伝ば曲線を示す。図は縦軸がき裂長さの対数で, 横軸は図6(a), (b), (c)が相対繰返し数比, 図6(d)が繰返し数である。なおき裂長さは軸と45°方向に投影した長さをとっている(以下同様)。図6(a)からわかるように平滑材のき裂伝ば挙動は応力レベルによって異なり, またモード II から I への遷移点を境に違っている。これは平滑材にはモード I と II のき裂が混在しそれぞれ伝ば速度が違い, またその遷移点におけるき裂長さが低応力ほど大きいなど, 遷移点が応力レベルあるいは試験片によって異なるためである。実際遷移点までのモード II によるき裂長さは, 通常1 mm 以上ときには3~4 mm もあり, 遷移点が寿命の75%に達

**1 ほとんどの場合, き裂は小穴の両縁に約0.1 mm 存在している。

する場合もある。また応力レベルが降伏応力以上であることに関連して、き裂の合体による伝ばが多い。したがって S20C 平滑材のき裂伝ばは、応力レベルおよび各伝ば過程でも不規則であり、伝ば則としてまとめることは難しい。

一方小穴材は、図 6(b) に示すようにモード I だけのき裂伝ばであることから、応力レベルに関係なく一

様でほぼ一本の曲線で表される。

平滑材と小穴材を比較するため図 6(c) に示すように、平滑材を小穴材と同様にき裂長さ 0.5 mm からの伝ばで表すと、両者が一致しないことがわかる。さらに両者を同じ応力レベルで比較すると、図 6(d) に示すようにき裂伝ば過程が互いに異なり、特に平滑材のき裂伝ばが二段に分かれ、モード II から I への遷移直後は伝ば速度が遅く徐々に速くなっていることがわかる。また図 4 の破線で示したように、平滑材のき裂伝ば寿命は小穴材のそれより長くなっている。しかしこ

図 4 S20C ねじり疲労の S-N 曲線

(a) 平滑材 ($N/N_f=0.75$) (b) 小穴材 ($N/N_f=0.28$)

図 5 ねじり疲労のき裂の状況 (S45C, $\tau_a=140$ MPa)

(a) 平滑材

(c) 平滑材 ($N_{0.5}$ 基準)

(d) 平滑材と小穴材の比較 ($N_{0.5}$ 基準, $\tau_a=140$ MPa)

図 6 S20C ねじり疲労のき裂伝ば曲線

図 7 S20C 小穴材のねじり疲労の dl/dN と l の関係

図 8 S20C 小穴材のねじり疲労の dl/dN と K_t の関係

図 9 S20C 小穴材のねじり疲労の dl/dN と $K_t l$ の関係

のような事情にもかかわらず、平滑材と小穴材で同一応力に対する $N_{0.5-f}$ の値は、全体的にみると比較的近い。

図 7 は小穴材のき裂伝ば速度とき裂長さの関係で、き裂長さが 1.5 mm 以下では傾き約 1 の直線で近似できる。すなわちき裂伝ば速度がき裂長さにほぼ比例しており、 $dl/dN \propto l$ の関係が成り立つ。

図 8 は小穴材のき裂伝ば速度の応力依存性を両対数で示したもので、両者の間には直線関係が成り立っている。そして直線の傾きは約 15 で、 $dl/dN \propto \tau_a^{15}$ の関係が成り立つ。しかもこの値は、図 4 の $\tau_a-N_{0.5-f}$ 関係の傾き k とほぼ近い。図 7, 8 から小穴材の場合はき裂の短い範囲において

$$dl/dN = C_1 \tau_a^n l \quad \dots\dots\dots (3)$$

(C_1, n : 各材料における定数)

図 10 S45C ねじり疲労の S-N 曲線

図 11 S45C ねじり疲労のき裂伝ば曲線

の関係が成り立つことがわかる(ただし、 τ_a が疲労限度に近い場合を除く)。このことを示したのが図 9 で、実際に dl/dN と $\tau_a^k l$ はほぼ 1 対 1 に対応している。すなわち、S20C 小穴材のねじり疲労でも、き裂伝ば速度は式(3)により一義的に決まる。

3.2 S45C のねじり疲労

3.2.1 S-N 曲線 図 10 に S45C 平滑材のねじり疲労の S-N 曲線を示す。平滑材の N_f と小穴材の $N_{0.5-f}$ はほぼ平行で、傾きは S20C と異なり $k \approx 7$ で回転曲げ等とほぼ同じである。これは、疲労限度が降伏応力よりかなり低く、実験した応力が降伏応力付近およびそれ以下であることによる。平滑材の $N_{0.5-f}$ は、破線で示すように傾きは小穴材とほぼ同じになるものの一致せず、平滑材の方が長寿命側にくる。これは図 5 に示すように、小穴材がモード I だけの伝ばであるのに対し、平滑材はモード I と II の伝ばが混在しているため、両者にき裂伝ば速度の差が生じているためである。

3.2.2 き裂伝ば 図 11 に S45C 平滑材および

図 12 S45C 小穴材のねじり疲労の dl/dN と l の関係

図 13 S45C 小穴材のねじり疲労の dl/dN と $\tau_a^k l$ の関係

図 14 S45C 小穴材のねじり疲労の dl/dN と $\tau_a^k l$ の関係

小穴材のき裂伝ば曲線を示す。平滑材は図 11(a)より、S 20 C の場合とほぼ同じき裂伝ば挙動を示すことがわかる。しかし S 20 C に比べモード II のき裂が約 1 mm 以下と比較的短く、中には図 5 に示すように約 0.2 mm と非常に短い場合もある。したがって遷移点もすべて寿命の約 50% 付近にあり比較的早い。

一方小穴材のき裂伝ば挙動は図 11(b)のように、応力レベルに関係なくほぼ 1 本の曲線で表せる。図 11(c)は平滑材と小穴材でき裂伝ば挙動を比較したものである。平滑材ではき裂伝ばモードの遷移が起こるため、両者は局所的にはかなり異なるが全体としては同様な傾向を示している。

図 12 は小穴材のき裂伝ば速度とき裂長さの関係である。き裂長さが 1.5 mm 以下で両者は 1 対 1 の対応を示し $dl/dN \propto l$ の関係が成り立つ。

図 13 は小穴材のき裂伝ば速度の応力依存性を示したもので、ほぼ $dl/dN \propto \sigma_a^2$ の関係が見られる。

図 12, 13 より小穴材については式(3)の関係が成り立つことになり図 14 にそのことを示す。図より dl/dN と $\sigma_a^2 l$ が 1 対 1 に対応していることがわかる。すなわち、S 45 C 小穴材のねじり疲労でも、き裂伝ば速度は式(3)により一義的に決まる。

以上の結果をまとめると、S 20 C および S 45 C のねじり疲労について次のことが言える。

(i) 平滑材のき裂伝ば寿命 $N_{0.5-f}$ と破断寿命 N_f の差は小さく、また $\tau_a-N_{0.5-f}$ 関係と τ_a-N_f 関係はほぼ平行になる。

(ii) 同一応力振幅のもとでは、平滑材と小穴材のき裂伝ば寿命 $N_{0.5-f}$ は異なるが、その差は小さくまた両者の $\tau_a-N_{0.5-f}$ 関係はほぼ平行になる。

(iii) 小穴材のき裂伝ば挙動は式(3)のき裂伝ば則によって支配され、き裂伝ば則と $\tau_a-N_{0.5-f}$ 関係の応力依存性はほぼ等しくなる。

したがって(i), (ii), (iii)より平滑材の S-N 曲線の傾きが、小穴材のき裂伝ば則からほぼ推定できることがわかる。

なお図 4 および図 10 で平滑材の $N_{0.5-f}$ が小穴材の

図 15 ねじりにおけるき裂と応力の関係

それより大きい理由は、図 15 に示すように長さが等しいモード I だけのき裂とモード I と II が混在するき裂では、き裂先端の鋭しさが前者のほうが鋭いからである。ただし、き裂長さが十分長くなるとその差はなくなる。このことは、実際図 6(c) および図 11(c)において、平滑材のき裂伝ばが遷移直後に遅くなっていることからよくわかる。

3.3 回転曲げ疲労 回転曲げ疲労に関してはこれまで多数の研究が発表されているが、ここではその確認と先述のねじり疲労と試験部が同じ試験片にて、両者を比較するために行った。

図 16, 17 に S 20 C および S 45 C 平滑材の S-N 曲線を示す。図より両者とも疲労限度が降伏応力よりかなり低く、傾きは $k \cong 8$ でこれまでの研究⁽²⁾⁽⁸⁾とほぼ一致することがわかる。また平滑材の $N_{0.5-f}$ は、破線で示すように小穴材のそれとほぼ一致する。

図 18, 19 にき裂伝ば曲線を示す。平滑材では両者とも一結晶粒程度のき裂になるまでややバラツキがあるものの、その後はほぼ 1 本の曲線で表せる [図 18(a), 19(a)]。また小穴材についても両者はほぼ 1 本の曲線で表せる [図 18(b), 19(b)]。そして平滑材と小穴材をき裂長さが 0.5 mm からの伝ばで比較すると両材ともほぼ同様のき裂伝ばを示す [図 18(c), 19(c)]。これは平滑材において、回転曲げの 0.5 mm 以上のき裂伝ばが常にモード I であることによるもので、モード I と II が混在するねじり疲労との違いは明確である。

図 20, 21 に dl/dN と $\sigma_a^2 l$ の関係を示す。両者とも平滑材と小穴材はほぼ一致し 1 対 1 の直線上に近似できる。したがってすべてについて式(2)が適用できる。そして S-N 曲線およびき裂伝ば曲線の応力依存性を表す指数 k, n は互いにほぼ等しい。

3.4 繰返しねじりと回転曲げの比較 以上を総合して、S 20 C 焼なまし材および S 45 C 焼なまし材のねじり疲労と回転曲げ疲労を比較すると次のようになる。

(1) 平滑材におけるき裂長さの対数と繰返し数比 N/N_f との関係は、ねじりでは上に凸の曲線となり曲げでは下に凸の曲線となる。これは、ねじりではき裂がかなりの長さに達するまで (S 20 C で 1~4 mm, S 45 C で 0.2~1 mm) モード II (内部的にはモード III) で伝ばするのに対し、曲げではほとんどの場合き裂が結晶粒を越えた直後からモード I で伝ばすること、およびモード II のき裂伝ば速度はモード I のそれより速い(表面で見た場合)ことによる。

(2) 平滑材におけるき裂伝ば寿命 $N_{0.5-f}$ と破断

図 16 S20C 回転曲げ疲労の S-N 曲線

図 17 S45C 回転曲げ疲労の S-N 曲線

図 18 S20C 回転曲げ疲労のき裂伝ば曲線

図 19 S45C 回転曲げ疲労のき裂伝ば曲線

図 20 S20C 回転曲げ疲労の da/dN と $\sigma\sqrt{l}$ の関係 図 21 S45C 回転曲げ疲労の da/dN と $\sigma\sqrt{l}$ の関係

寿命 N_f の差(図 4, 10, 16, 17 の●印と○印の差)は、ねじりでは小さく曲げでは大きい。これは、 $\sigma_{\max}/\tau_{\max}$ がねじりでは 1 であり曲げでは 2 であることに関係している。それは、き裂発生には $\tau_{\max}$ の振幅が支配的であり、き裂伝ばには $\sigma_{\max}$ の振幅が強く関係するため、したがって平滑材の全寿命の中でき裂伝ばの占める割合がねじりで大きく曲げで小さいからである(図 6(a), 11(a)と図 18(a), 19(a)とを比較してわかるように、き裂長さが 0.5 mm に達してからの余寿命が、ねじりでは全寿命の約 50~80%とかなり長いのにに対し、曲げでは約 20%と短い)。

(3) 同一応力振幅のもとにおける平滑材と小穴材の $N_{0.5-f}$ の値は、ねじりでは異なるが曲げではほぼ等しい。これは、ねじりのき裂伝ばが、小穴材ではモード I であるのに対し平滑材ではき裂伝ばの途中でモード II からモード I への遷移が起こること、および曲げのき裂伝ばが常にモード I であることによる。このようにねじりの $N_{0.5-f}$ は平滑材と小穴材で異なるが、図 4, 10 からわかるように両者の $N_{0.5-f}$ がほぼ平行なので、ねじりでも平滑材における $N_{0.5-f}$ の応力依存性は小穴材のそれによってほぼ推定できる。

(4) ねじりと曲げにおける N_f の応力依存性は、S 45 C の場合はほぼ等しいが、S 20 C では両者は大きく異なる。これは、S 20 C ではねじりの疲労限度が降伏応力 τ_{sl} とほぼ等しく、したがって N_f の応力依存性が降伏応力より大きいところで調べられているためである(降伏応力以上では、弾性域に比べ応力レベルのわずかな増加が、ひずみ幅の大きな増加を招く)。

4. 結 言

S 20 C, S 45 C の焼なまし材を用いて、平滑材と小穴材のねじり疲労試験および比較のため回転曲げ疲労試験を行い、S-N 曲線と微小き裂伝ば則との関係について検討した結果以下の結論が得られた。

(1) 平滑材におけるき裂長さの対数と繰返し数比 N/N_f との関係は、ねじりでは上に凸の曲線となり曲

げでは下に凸の曲線となる。これは、き裂伝ばがねじりではモード I と II が混在するのに対し、曲げではモード I だけであることによる。

(2) ねじりにおける、モード II からモード I へ遷移するときのき裂長さは、S 45 C では短く(0.2~1 mm) S 20 C では長い(1~4 mm)。

(3) 平滑材のねじりにおいて、き裂伝ば寿命 $N_{0.5-f}$ と破断寿命 N_f の差は小さく、また $\tau_a-N_{0.5-f}$ 関係と τ_a-N_f 関係はほぼ平行になる。

(4) 同一応力振幅のもとで、ねじりにおける平滑材と小穴材のき裂伝ば寿命 $N_{0.5-f}$ は異なるが、その差は小さくまた両者の $\tau_a-N_{0.5-f}$ 関係はほぼ平行になる。

(5) 小穴材のねじりにおいて、き裂伝ば挙動は式(3)のき裂伝ば則によって支配され、き裂伝ば則と $\tau_a-N_{0.5-f}$ 関係の応力依存性はほぼ等しくなる。

(6) (3), (4), (5) よりねじりにおける平滑材の S-N 曲線の傾きが、小穴材のき裂伝ば則からほぼ推定できる。

(7) ねじりと曲げにおける N_f の応力依存性は、S 45 C の場合はほぼ等しく、S 20 C では両者は大きく異なる。これは部材の疲労限度と降伏応力の関係による(降伏応力以上では、弾性域に比べ応力レベルのわずかな増加が、ひずみ幅の大きな増加を招く)。

文 献

- (1) 例えば、西谷, 疲労強度学, (昭 60), 27, オーム社。
- (2) Nisitani, H. and Goto, M., Miller, K. J. and delos Rios, E. R. 編, *The Behavior of Short Fatigue Cracks*, EGF Pub. 1 (1986), 461, Mech. Eng. Pub.
- (3) 西谷・河野, 機論, No. 720-1 (昭 47), 33.
- (4) 西谷・野田, 機論, 51-463, A (昭 60), 775.
- (5) 例えば、西谷・ほか 2 名, 機論, 50-449, A (昭 59), 23.
- (6) 西谷・ほか 2 名, 材料, 33-366 (昭 59), 73.
- (7) 西谷・森田, 機論, 39-322 (昭 48), 1711.
- (8) 例えば、西谷・森光, 機論, 42-354 (昭 51), 325; 西谷・皮龍石, 機論, 49-440, A (昭 58), 431; 西谷・後藤, 機論, 49-443, A (昭 58), 779; 広瀬・加藤, 機論, 45-400 (昭 54), 1496; 西谷・高瀬, 材料, 33-369 (昭 59), 666.

討 論

〔質問〕 加藤 容三〔岐阜大学工学部〕

ねじりの場合、モードⅠとモードⅡのき裂伝ばが混在するなど、複雑な伝ば挙動を示す平滑材において、その $S-N$ 曲線の傾きが、モードⅠのみの伝ば挙動を示す小穴材のき裂伝ば則から推定できるなど、貴重な知見を得られたことに対して、敬意を表する。

(1) モードⅡの場合とモードⅠの場合とで、き裂形状のアスペクト比に違いはないか。なお、モードⅡから、モードⅠへの遷移が起こる条件について、なにかお考えがあれば、ご教示願いたい。

(2) 図15は、板材に対する貫通き裂をモデルとされたのか。もし、そうだとすれば、き裂先端の鋭しさを

を議論する場合、内部方向への伝ば挙動の違いを考慮する必要はないか。

〔回答〕 (1) 平滑材におけるモードⅡの場合のき裂面形状のアスペクト比は調べていない。

またモードⅡからモードⅠへの遷移条件は、材料組織と深く関連しており、力学的条件のみでは表せないようである（例えば、軸方向の圧延組織が明りょうな場合には、モードⅡで軸方向にかなり伝ばする傾向がある）。

(2) 図15は、丸棒平滑材に生じた表面き裂と、平滑材の中央に直径と深さが同じ微小穴をあけたものに生じた表面き裂とを比較したものである。