拡散焼なましした炭素鋼圧延丸棒平滑材の回転曲げと ねじり疲労における疲労限度の比較*

西谷 弘信^{*1}, 福田 孝之^{*2}, 藤村 顕世^{*2}

Comparison of Fatigue Limits in Rotating Bending and Torsional Fatigue of Rolled Steel Plain Specimens Subjected to Diffusion Annealing

Hironobu NISITANI, Takayuki FUKUDA and Kensei FUJIMURA

Rotating bending and torsional fatigue tests were carried out on plain specimens and specimens with a hole of rolled carbon steel which were diffusion annealed. The present specimens are regarded as isotropic materials although the original materials have a banded structure. The fatigue limit ratio between rotating bending and torsional fatigue (τ_w/σ_w) of the specimens is different from that of a fully annealed rolled carbon steel, and is approximately the same as that of isotropic cast carbon steel. We should use isotropic materials in discussing the effects of combined stresses on fatigue. In the torsional fatigue tests, crack propagation on plain specimens was of the shear type in the initial stage and of the tension type in the later stage. Cracks of the shear type were generated in both the circumferential and axial directions, and their length was shorter than that of fully annealed rolled carbon steel. There was no great difference between the nonpropagating crack length in torsion and that in rotating bending. The crack growth law in rotating bending and that in torsion are expressed by $dl/dN \propto \sigma_a^2 l$ or $dl/dN \propto \tau_a^2 l$, respectively.

Key Words: Fatigue, Torsion, Bending, Combined Stress, Isotropy, Crack Propagation, Diffusion Annealing, Fatigue Limit, S-N Curve, Small-Crack Growth Law

1. 緒 言

組合せ応力による疲労に関しては、曲げとねじりの疲労限度を比較することによって、その物理的背景を知ることができる。また、疲労は局所的すべり、すなわち微視的降伏に起因するものであるから、巨視的降伏と密接に関係しているはずである。したがって、これまでの組合せ応力による疲労に関する研究では、曲げとねじりの疲労限度 σ_w, τ_w の比 τ_w/σ_w を巨視的降伏条件との関係で議論したものが多く、例えば、一般の金属材料の τ_w/σ_w の値については、巨視的降伏条件であるせん断ひずみエネルギー説 ($\tau_s/\sigma_s \cong 0.58$) に従うとするものが多い^{(1)~(5)}。しかし著者らが行った実験では、同じ炭素鋼焼なまし材でも、軸方向にフェライト・パーライトの層状組織をもつ圧延丸棒材(S 20 C および S 45 C)⁽⁶⁾ とほぼ等方性材料である炭素鋼鋳鋼(SC 450)⁽⁷⁾ とにおいて、ねじりと曲げの疲労限度の比は、前者で $\tau_w/\sigma_w \cong 0.57$ 、後方で $\tau_w/\sigma_w \cong 0.68$ となり、等方性材料では 0.58 よりはるかに大きい。また同じ圧

延丸棒材(S 45 C)を、焼入れ焼戻しにより等方性材料に近づけた試験片を用いた疲労試験⁽⁸⁾でも $\tau_w/\sigma_w \cong 0.68$ となり、焼なまし材のそれより大きく等方性材料である炭素鋼鋳鋼の結果とほぼ同じ値である。その原因は、ねじり疲労が組織の影響を大きく受けるためである⁽⁹⁾。すなわち、圧延丸棒焼なまし材のねじり疲労では、組織が層状であるためにフェライト部に局所的なひずみの集中が起こりやすいことを反映して、ねじりの疲労限度が相対的に低下するためである。このように、材料の局所的な状態が関係する疲労と材料の平均的な性質が関係する巨視的降伏とは破損のメカニズムが異なるため、一方向負荷の巨視的降伏条件を疲労破壊の限界条件として利用することは困難であると思われる。また、組合せ応力による疲労を考える上で、材料が等方性であるか否かは重要な問題であると言える。

一般に圧延丸棒材は等方性材料とはみなせない⁽⁷⁾。しかし層状組織をもつ圧延丸棒材でも、熱処理により等方性材料に近づけることができる。本研究では、先の焼なまし材の実験⁽⁶⁾に用いた層状組織をもつ S 45 C 圧延丸棒材を、拡散焼なましにより、降伏応力や引張強さをほとんど変えずに、層状組織を消して等方性材料に近づけた試験片を用いて、ねじりと回転曲げの

* 原稿受付 平成 6 年 3 月 18 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)。

疲労試験を行い、その疲労限度ならびにき裂発生と伝ばについて通常の層状組織をもつ完全焼なまし材の結果⁽⁶⁾と比較しながら検討した。これにより、同じ素材から得られた炭素鋼焼なまし材で、層状組織のある材料とない材料とを比較できるため、層状組織の影響がより明確になるものと思われる。

2. 使用材料, 試験片および実験方法

素材は市販の S 45 C 圧延丸棒 (ϕ 22 mm) で表 1 にその化学成分を示す。それを 1200°C で 6 時間の拡散焼なましおよび 845°C で 30 分の焼ならしと 1 時間の焼なましを行った後機械加工した(以後これを拡散焼なまし材あるいは本材料と呼び、先の研究に用いた同じ素材の完全焼なまし材を圧延材と呼ぶ)。図 1 に回転曲げおよびねじり疲労試験片の形状を示す。試験部分の形状は両者同じで、それらの応力集中係数 K_t はねじりで 1.007, 曲げで 1.012 であり 1 に近いので、以下ではこれを平滑材と呼ぶ。平滑材は機械加工後 650°C で 1 時間真空焼なましを行い、さらに表面を約 30 μ m

電解研磨により除去した後実験を行った。小穴材は電解研磨後試験片の最小断面部に図 1 (c) に示す小穴をドリルによりあけ、その後に同様の真空焼なましを行い実験に供した。表 2 に機械的性質を示す。なお表 2 には比較のために圧延材の値⁽⁶⁾も示している。図 2 に組織写真を示す。図 2 (b) の縦断面を見ると、同じ素材から製作した圧延材⁽⁹⁾ において見られるフェライトとパーライトの層状組織はほとんどなく、ほぼ等方性材料とみなせる。なおフェライト結晶粒の平均粒径は約 9 μ m である。

用いた試験機は島津ねじり疲労試験機 TB-10 (容量 ± 50 N $\cdot$ m, 繰返し速度約 33 Hz) と小野式回転曲げ疲労試験機 (容量 100 N $\cdot$ m, 回転数 3 600 rpm) である。

表面き裂の観察はレプリカ法により光学顕微鏡 ($\times 400$) 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

3.1 停留き裂 図 3 は、平滑材の疲労限度における停留き裂を観察したものである。ねじりでは、最大せん断応力方向(この場合は軸方向)にせん断形のき裂が発生し、わずかに伝ばした後停留している。一方回転曲げでは、き裂は粒界に沿って発生し、この場合もわずかに円周方向に伝ばした後停留している。このように本材料における停留き裂は、両者 50 μ m 程度と大きな差はなく、その長さも比較的短い。これを圧延

表 1 化学成分 [%]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.44	0.20	0.69	0.009	0.009	0.07	0.04	0.05

(a) 回転曲げ

(b) ねじり

(c) 小穴

図 1 試験片形状

(a) 横断面

(b) 縦断面

図 2 組織写真

表 2 機械的性質

	Heat treatment	σ_{sl}	σ_B	σ_T	ϕ	τ_{sl}	σ_w	τ_w	τ_w/σ_w
S45C-DA	1200°C 6 hr $\rightarrow$ F.C. 845°C 0.5 hr $\rightarrow$ A.C. 845°C 1 hr $\rightarrow$ F.C.	328	560	1050	55.5	214	240	155	0.65
S45C ⁽⁶⁾	845°C 1 hr $\rightarrow$ F.C.	335	569	1061	57.2	214	245	135	0.55

σ_{sl} : Lower yield stress MPa, σ_B : Ultimate tensile strength MPa, σ_T : True fracture strength MPa

ϕ : Reduction of area %, τ_{sl} : Lower shearing yield stress MPa, σ_w : Rotating bending fatigue limit MPa

τ_w : Torsional fatigue limit MPa

図 3 拡散焼なまし材の疲労限度における停留き裂の観察

図 4 圧延材の疲労限度における停留き裂

材の結果と比較するとねじりの場合が特に大きく異なる。図 4 は圧延材の疲労限度における停留き裂⁽⁶⁾を示したものである。図 4 (a) でわかるように圧延材のねじりでは、パーライトに挟まれたフェライト部に拡散焼なまし材のそれより長に長い停留き裂(0.5~1 mm)が発生する。これは、フェライトとパーライトの層状組織の影響である⁽⁹⁾。圧延材の回転曲げでは、フェライト帯に発生したき裂は、パーライト帯に遮られて停留することが多く、したがってその長さはフェライト帯の幅程度でありねじりに比べてはるかに短い。

3・2 疲労限度 図 5 に平滑材のねじりおよび回転曲げ疲労の $S-N$ 曲線を示す(○印)。疲労限度はそ

図 5 $S-N$ 曲線

れぞれ $\tau_w=155$ MPa, $\sigma_w=240$ MPa で、両者の比は $\tau_w/\sigma_w \cong 0.65$ である。この値は、せん断ひずみエネルギー説の関係(0.58)より大きく、また表 2 に示すように同じ素材の層状組織をもつ圧延材の結果(0.55)⁽⁶⁾と比較しても大きく、等方性材料とみなせる炭素鋼鍛鋼の結果(0.68)⁽⁷⁾に近い。これは、3・1 節に見られるように、圧延材のような層状組織のある材料と、本材料のような等方性材料とで、ねじりにおける疲労挙動に違いがあるためである。圧延材のねじり疲労⁽⁹⁾におい

では、最大せん断応力方向と圧延方向が一致するため、パーライトに挟まれたフェライト部が局所的に大きな被害を受けやすく、せん断形の比較的長いき裂が層状組織に沿って軸方向に生じやすいのに対して、本材料では、図6に示すように、き裂は軸方向だけでなく一つの最大せん断応力方向である円周方向にも同程度の確率で発生し、またせん断形き裂の長さも0.1 mm程度であり圧延材のそれ(約1 mm)よりかはるかに短い。このような理由から、本材料では、ねじりの疲労限度が相対的に高くなり τ_w/σ_w が圧延材のそれより大きくなったものと考えられる。実際に表2を見ると、本材料と圧延材とで、静的強度やフェライト粒径および回転曲げの疲労限度等はほぼ近い値であるのに対し、ねじりの疲労限度は明らかに本材料のほうが高くなっている。

以上に述べた、同じ素材から作られた層状組織をもつ異方性材料(圧延材)と層状組織を消した等方性材料(拡散焼なまし材)との比較により、ねじりと回転曲げの疲労限度の比が両材料で異なることおよび等方性材料ではその値がせん断ひずみエネルギー説の関係より

図6 ねじり疲労における一般的な表面状態 ($\tau_a=200$ MPa)

大きくなることなどがより明確になった。このように、組合せ応力の疲労試験では、供試材が等方性であるか否かは重要な問題であり、圧延材は等方性材料とはみなせない。

3.3 すべり帯の観察 図7はすべり帯の様子を示したもので、図7(a)、(c)は曲げとねじりの疲労限度における様子を、また図7(b)はねじりで曲げの疲労限度と $\tau_{\max}$ が同じになる応力 ($\sigma_w/2$) のもとでの様子を示したものである。曲げでは $\sigma_{\max}/\tau_{\max}=2$ 、ねじりでは $\sigma_{\max}/\tau_{\max}=1$ であるため疲労限度における $\tau_{\max}$ はねじりのほうが大きい。したがって、曲げとねじりの疲労限度のすべりを比較すると、ねじりのほうが被害が大きい。しかし、曲げとねじりで $\tau_{\max}$ が同じなら疲労被害は似ている。これらの状況は、低炭素鋼⁽¹⁰⁾や鋳鋼⁽⁷⁾の結果とほぼ同じである。

3.4 き裂伝ば 著者らはこれまで、炭素鋼圧延丸棒材の回転曲げおよび引張圧縮疲労において、き裂伝ば速度と $S-N$ 曲線との間に密接な関係があることを示してきた^{(11)~(13)}。すなわち、き裂伝ば速度は次式でよく整理でき、

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

(dl/dN : き裂伝ば速度, C_1, n : 定数, σ_a : 応力振幅, l : き裂長さ)

またそのときの $S-N$ 曲線を

$$\sigma_a^k N_f = \text{一定} \quad \dots\dots\dots (2)$$

(N_f : 破断繰返し数, k : 定数)

で表せば、両式の指数 n と k の間には $n \cong k$ の関係がある。

一方、層状組織をもつ圧延材のねじり疲労について同様の研究を行った結果、小穴材のき裂伝ばには引張形のき裂を対象とする式(1)が適用できたが、平滑材には適用できなかった⁽⁶⁾。これは、軸方向にパーライ

(a) 回転曲げの疲労限度 ($\sigma_w=240$ MPa)

(b) ねじりで回転曲げの疲労限度と $\tau_{\max}$ が同じ場合 ($\tau_{\max}=\sigma_w/2=120$ MPa)

(c) ねじりの疲労限度 ($\tau_w=155$ MPa)

図7 疲労限度以下における表面状態の比較

 図 8 ねじり疲労における表面状態の変化 ($\tau_a = 200$ MPa, $N_f = 19.2 \times 10^4$)

図 9 平滑材のねじり疲労のき裂伝ば曲線

(a) 平滑材

(b) 小穴材

 図 10 ねじり疲労の dl/dN と $\tau_a^k l$ の関係

トとフェライトが層状に分布する圧延丸棒材では、せん断形で発生した軸方向のき裂がフェライト層に沿って長く伝ばするためである。しかし同じ炭素鋼でも圧延組織のない等方性材料とみなせる炭素鋼鋳鋼で実験した結果、ねじり疲労においても式(1)がほぼ成立した⁽⁷⁾。本材料も、3・3節で見たように、圧延丸棒材ではあるが、熱処理により圧延組織の影響が薄れ等方性材料に近づいているため、ねじり疲労においても式(1)が成り立つ可能性がある。そこで次に、 $S-N$ 曲線と微小き裂伝ば則との関係について検討する。

3・4・1 ねじり疲労 図5の $S-N$ 曲線には、小穴材の穴縁の影響がなくなるき裂長さ(0.5 mm)から破断までの寿命、すなわちき裂伝ば寿命 $N_{0.5-f}$ も図示している(Δ 印)。また、平滑材についても同様にき裂伝ば寿命 $N_{0.5-f}$ を図示している($\bullet$ 印)。

図5からわかるように、平滑材の $S-N$ 曲線も次式

で表される。

$$\tau_a^k N_f = \text{一定} \quad \dots\dots\dots (3)$$

(τ_a : 応力振幅, N_f : 破断繰返し数, k : 定数)

この場合の指数は $k \cong 10$ であり、またき裂の起点を限定した小穴材の伝ば寿命曲線は $k \cong 8$ である。平滑材の $N_{0.5-f}$ は、破線で示すように小穴材と一致せず、平滑材のほうがやや長寿命側にくる。これは平滑材と小穴材でき裂伝ばが多少異なるためである。図8に平滑材のき裂伝ばの様子を示す。図でわかるように平滑材のき裂は、最大せん断応力方向である、軸方向あるいは軸と直角な円周方向(せん断形)に始まり、途中で軸と45°方向(引張形)に遷移する。一方小穴材は、最初から軸と45°方向(引張形)に伝ばする。このように平滑材と小穴材では伝ば過程が多少異なる。これらの状況は圧延材⁽⁶⁾と同じであるが、異なるのは平滑材におけるせん断形のき裂が、圧延材ではほとんど圧延方向

図 11 平滑材の回転曲げ疲労のき裂伝ば曲線

(a) 平滑材

(b) 小穴材

図 12 回転曲げ疲労の dl/dN と $\sigma_a^8 l$ の関係

である軸方向に発生するのに対し、本材料の場合は図 6 に示すように軸方向と円周方向の両方向に同程度の確率で発生し、しかもその長さが 0.1 mm 程度と比較的短い。これは層状組織である圧延材との大きな違いであり、本材料が等方性材料に近づいたためである。

図 9 に平滑材のき裂伝ば曲線を示す。縦軸はき裂長さの対数で、横軸は相対繰返し数比である。ここでき裂長さは、ねじりの場合軸と 45° 方向が主応力方向であるため、軸と 45° 方向に投影した長さをとっている。図を見ると、圧延材で見られた上に凸で応力レベルで異なる曲線ではなく、回転曲げの結果と同じ下に凸の曲線となり、応力レベルに関係なくほぼ 1 本の曲線で表せる。これは先述したように、拡散焼なましにより等方性材料に近づいたことからせん断形のき裂が比較的短くなり、繰返しの初期の段階から引張形で伝ばするためである。このように素材が同一の圧延丸棒材であっても、通常の完全焼なまし材と拡散焼なまし材とでは、き裂伝ばの様子も異なる。

図 10 は、本材料のき裂伝ば速度と $\tau_w^2 l$ の関係を見たもので、平滑材、小穴材ともに傾き 1 の直線で近似できる。したがって、き裂の短い範囲において次式のき裂伝ば則が成り立つことがわかる。

$$dl/dN = C_1 \tau_w^2 l \quad \dots\dots\dots (4)$$

(C_1, n : 各材料における定数)

すなわち、本材料のねじり疲労では、き裂伝ば速度は式(4)により一義的に決まる。そして指数 n は、それぞれ図 5 の平滑材の $S-N$ 曲線および小穴材のき裂伝ば寿命曲線の応力依存性を表す指数 k に近い。

3・4・2 回転曲げ疲労 図 5 の回転曲げ疲労の $S-N$ 曲線を見ると、平滑材の N_f と $N_{0.5-f}$ (●印)の傾

きはほぼ同じであり、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 11 に平滑材のき裂伝ば曲線を示す。応力レベルに関係なくほぼ 1 本の曲線で表せる。図 12 に平滑材と小穴材のき裂伝ば速度と $\sigma_a^8 l$ の関係を示す。両者とも傾き 1 の直線で近似でき、式(1)のき裂伝ば則が適用できる。また数値的にも両者はほぼ同じである。そして応力依存性を示す指数 n は 8 で、図 5 の $S-N$ 曲線およびき裂伝ば寿命曲線の応力依存性を表す指数 k に近い。

以上のように、圧延丸棒材でも拡散焼なましにより圧延の影響が薄れ等方性材料に近い状態になると、ねじり疲労のき裂伝ばも式(4)のき裂伝ば則が適用でき、き裂伝ば則と $S-N$ 曲線とは密接な関係をもつことになる。

4. 結 言

S 45 C 圧延丸棒を拡散焼なましによって圧延組織を消し、等方性材料に近づけた材料を用いて、回転曲げとねじりの平滑材の疲労試験を行い、疲労限度およびき裂の発生と伝ば過程について検討した結果以下の結論が得られた。

(1) ねじりと回転曲げの疲労限度の比は $\tau_w/\sigma_w \cong 0.65$ であり、せん断ひずみエネルギー説による値(0.58)より大きく、また同じ素材から製作した完全焼なまし材の結果(0.55)よりも大きく、等方性材料で得られた結果(0.68)に近い。これは圧延丸棒材が拡散焼なましにより圧延の影響が薄れて等方性材料に近づき、ねじりの疲労限度が相対的に高くなったためである。

(2) 本材料では、平滑材のねじり疲労のき裂伝ばには、引張形とせん断形が混在し、せん断形のき裂は軸方向だけでなく円周方向にも同程度の確率で発生する。またせん断形から引張形へ遷移するときのき裂長さは、圧延材に比べて短く 0.1 mm 程度である。

(3) ねじり疲労の場合も引張形で伝ばするき裂の伝ば挙動は、平滑材、小穴材ともに式(4)のき裂伝ば則によって支配される。またき裂伝ば則と $S-N$ 曲線において応力依存性を示す指数の値は近く、さらにその値は回転曲げ疲労の結果に近い。

最後に、本研究の遂行にあたり、ご協力いただいた佐賀大学理工学部、西田新一教授ならびに、長崎県工学技術センター、松永一隆氏、太田泰平氏に深く感謝する。また、当時佐世保高専学生の、永渕博志、山脇勝也君に感謝する。

文 献

- (1) 西原・河本, 機論, 6-24 (1940), I-8.
- (2) 西原・河本, 機論, 7-29 (1941), I-85.
- (3) Peterson, R. E., *Colloquium on Fatigue, IUTAM*, (1956), 186.
- (4) 中沢・本間, 金属の疲労強度, (1982), 26, 養賢堂.
- (5) 石橋, 金属の疲労と破壊の防止, (1967), 28, 養賢堂.
- (6) 西谷・福田, 機論, 55-512, A (1989), 710.
- (7) 西谷・福田, 機論, 59-558, A (1993), 311.
- (8) 西谷・福田, 機論, 59-564, A (1993), 1806.
- (9) 西谷・福田, 機論, 57-538, A (1991), 1287.
- (10) 西谷・村上, 機論, 35-275 (1969), 1389.
- (11) 西谷(編), 疲労強度学, (1985), 24, オーム社.
- (12) 西谷・ほか2名, 機論, 50-449, A (1984), 23.
- (13) Nisitani, H. and Goto, M. (Miller, K. J. and de los Rios, E. R. 編), *The Behavior of Short Fatigue Crack*, (1986), 461, EGF.