S45C 焼なまし材の回転曲げと平面曲げ における疲労過程の比較†

西 谷 弘 信* 皮 籠 石 紀 雄** 若 原 稔**

Comparison of Fatigue Processes between Rotating Bending and Plane Bending in an Annealed Steel

by

Hironobu NISITANI

(Faculty of Engineering, Kyushu University, Fukuoka)

Norio KAWAGOISHI and Minoru WAKAHARA

(Faculty of Engineering, Kagoshima University, Kagoshima)

The rotating bending and the plane bending fatigue tests were carried out on specimens having a small blind hole (diameter: 0.3 mm) and smooth specimens of an annealed 0.42% C steel.

The difference in fatigue strength between these two types of loading was investigated by the successive observations of crack initiation and crack propagation processes.

The results obtained are summarized as follows:

(1) The number of cycles to failure in the plane bending test was larger than that in the rotating bending test under the same stress.

(2) There was little difference in fatigue limit and in length of non-propagating cracks between two types of loading.

(3) The crack growth rate in the rotating bending test was faster than that in the plane bending test under the same stress and crack length. On the other hand, the crack initiation lives were roughly equal each other. Therefore, the difference in fatigue strength between two types of loading results from the difference of their crack propagation processes.

(Received Dec. 27, 1982)

キー・ワード：回転曲げ，平面曲げ，連続観察，き裂発生，き裂伝ば速度

1 緒 言

一般に，平滑材の $S-N$ 曲線と微小き裂の伝ば則との間には密接な関係があり，時間強度の応力依存性は主として微小き裂伝ば速度の応力依存性によって支配されている。^{1)~3)}

これは，平滑材でも疲労寿命の大部分がき裂伝ば寿命によって占められ，き裂伝ば寿命の中で微小き裂の伝ば寿命の割合が大きいためである。

以上の点を考慮すれば，負荷方法が異なる場合の $S-N$ 曲線の相違は主としてき裂伝ば特性の相違に起因すると思われる。

本論文では，このような観点から，円形断面をもつ平滑材の回転曲げと両振平面曲げにおける $S-N$ 曲線を比較し，その相違の物理的背景を，両者におけるき

裂発生過程およびき裂伝ば過程の観察と微小き裂の伝ば則とを通じて検討した。

平滑材の回転曲げと平面曲げにおける疲労強度の比較に関しては，中村ら⁴⁾および鎌田⁵⁾の詳細な報告があり，両負荷形式における時間強度の相違が塑性ひずみ幅の相違に基づいて説明されている。しかし，これらの研究はき裂発生過程と伝ば過程とを明確に区別して取扱ったものではない。

2 材料，試験片および実験方法

用いた材料は市販の S45C 圧延丸棒(直径約 19mm)である。その化学成分および熱処理後の機械的性質を Table I に示す。

試験片は，840℃ 1 時間の焼なまし後製作した。その形状，寸法を Fig. 1 に示す。小穴材は主にき裂伝ば特性を比較するために，また部分切欠き材は切欠き係数が小さく，ほぼ平滑材とみなせるので平滑材におけるき裂発生および初期伝ば過程を比較するのに用い

† 原稿受理 昭和57年12月27日

* 正 会 員 九州大学工学部 福岡市東区箱崎

** 正 会 員 鹿児島大学工学部 鹿児島市郡元

Table I. Chemical composition and mechanical properties.

Chemical composition (%)					Mechanical properties (MPa, %)			
C	Si	Mn	P	S	σ_{sl}	σ_B	σ_T	ϕ
0.42	0.27	0.81	0.013	0.016	377	659	1 190	54

(a-1) Specimen with small hole (rotating bending).
 (a-2) Smooth specimen (rotating bending).
 (b-1) Specimen with small hole (plane bending).
 (b-2) Smooth specimen (plane bending).

Fig. 1. Shape and dimensions of specimens.

た。以下ではこの部分切欠き材を平滑材とよぶことにする。

試験片は、機械加工の後 600℃ 1 時間の応力除去焼なましを行い、さらに加工影響層を除去するため直径で約 50 μ m 電解研磨してから実験に供した。

き裂長さとしては表面に沿った長さ (小穴材の場合小穴径も含む) をとり、その測定にはレプリカ法を用いた。また表面状態の観察はレプリカに金を蒸着したものについて金属顕微鏡で行った。

使用した試験機は、回転曲げの場合、小野式回転曲げ疲労試験機 (容量 98N $\cdot$ m, 回転数約 3 400 rpm) で平面曲げの場合、島津曲げねじり疲労試験機 TB-10B (容量 98N $\cdot$ m, 繰返し速度, 約 2 000 cpm) でありいずれも定荷重型である。

3 実験結果および考察

3.1 S-N 曲線

Fig. 2 に平滑材, 小穴材の回転曲げおよび平面曲げ試験における S-N 曲線を示す。また Table II は時間強度および疲労限度を両負荷形式間で比較して整理したものである。これらからわかるように時間強度は、小穴材でも平滑材でも、回転曲げより平面曲げの方が大きい。そして応力が大きいほどその傾向は強いが、平均的には約一割大きい。ところが疲労限度は、小穴材でも平滑材でも、両負荷形式においてほとんど差は

Fig. 2. S-N curves.

Table II. Comparison of fatigue strengths in rotating bending and plane bending tests.

Specimen	No. of cycles	Fatigue strength (MPa)		Ratio of fatigue strengths
		Rotating bending	Plane bending	
Specimen with small hole	5×10^4	319	353	1.11
	10^5	294	321	1.09
	5×10^5	239	250	1.05
	10^7	196	191	0.97
Smooth specimen	5×10^4	346	370	1.07
	10^5	321	341	1.06
	5×10^5	260	274	1.05
	10^7	235	235	1

なく、またそのときの停留き裂長さも両負荷形式でほぼ等しい (小穴材で約 1.2 mm, 平滑材で約 50 μ m)。

3.2 き裂発生と伝ば

3.2.1 小穴材におけるき裂伝ば曲線 Fig. 3, 4 に小穴材の回転曲げおよび平面曲げ試験におけるき裂伝ば曲線を示す。縦軸はき裂長さの対数 $\log l$ で、横軸は繰返し数 N である。いずれもき裂が短い間は直線で表されるので、その範囲ではき裂伝ば速度がき裂長さに比例することになる。特に平面曲げの場合、かなり長いき裂まで直線関係が成立している。小穴材を用

Fig. 3. Crack growth curves of specimens with small hole (rotating bending).

Fig. 4. Crack growth curves of specimens with small hole (plane bending).

いると各種材料のき裂伝ば特性を比較するのに都合がよいことがいくつかの荷形式で示されているが、上記の事実はその中でも平面曲げがき裂伝ば特性の評価に特に有効であることを示唆している。

Fig. 5 は横軸にき裂長さが 0.5 mm (き裂面の形状がそろい、小穴の影響が消えると考えられる長さ) になってからの繰返し数 $N-N_{0.5}$ をとった場合のき裂伝ば曲線である。Fig. 5 からわかるように、一般に回転曲げのき裂伝ば速度は平面曲げのそれより大きく、応力が高いほどその差は大きい。Fig. 6 はき裂長さが、0.5 mm から 3 mm までと 0.5 mm から破断までの繰返し数 $N_3-N_{0.5}$, $N_f-N_{0.5}$ を基準にした相対繰返し数とき裂長さの関係を回転曲げと平面曲げで比較したものである。これによると、それぞれの荷形式では応力レベルに無関係にはば一本の曲線で表され、とくに 0.5 mm から 3 mm までのき裂伝ば寿命を基準と考えた場合、荷形式の差による影響も認められない。

Fig. 5. Comparison of crack growth curves between rotating bending and plane bending (specimen with small hole).

3・2・2 平滑材におけるき裂発生寿命とき裂伝ば曲線 前節で述べたように、小穴材の結果では、0.5 mm 以上のき裂の伝ば速度は平面曲げより回転曲げにおいて大きい。長さ 0.5 mm 以上のき裂の伝ば挙動は、平滑材と小穴材とではほぼ同じとみなせるので、平滑材

Fig. 6. Relation between cycle ratio and crack length (rotating bending and plane bending of specimens with small hole).

における 0.5 mm 以上のき裂の伝ば速度は、平面曲げにおけるより回転曲げにおいて大きいはずである。平滑材の寿命の中で、0.5 mm のき裂が生じるまでの繰返し数も当然かなり大きいので、この節では、平滑材に 0.5 mm のき裂が生じるまでの疲労挙動を回転曲げと平面曲げにおいて比較する。

Fig. 7 に平滑材の回転曲げおよび平面曲げ試験におけるき裂伝ば曲線を示す。この場合も $\log l$ と N の間には直線関係が成立し、 $l > 0.5$ mm の範囲では小穴材の結果に近い。すなわち、平滑材におけるき裂伝ば特性が小穴材により評価できることがわかる。Fig. 7 からわかるように、 $l > 0.1$ mm の範囲において、両荷形式でもき裂伝ば速度は、応力が等しい場合、平面曲げより回転曲げの方が大きい。

Fig. 7. Crack growth curves of smooth specimens (rotating bending and plane bending).

Fig. 8. Comparison of the change in surface between rotating bending and plane bending ($\sigma=255\text{MPa}$).

き裂伝ば速度がき裂長さに比例する最小き裂長さは両負荷形式ともに約 0.1mm である。この長さは疲労限度で認められる微視的停留き裂長さのオーダーである。両負荷形式においてき裂発生寿命が全寿命の中に占める割合はかなり小さく、また両負荷形式間のき裂発生寿命の差は、き裂発生が組織の影響を受けやすくばらつくことを考慮すればそれほど大きくないものと思われる。とくに応力レベルが低いところではその差はほとんど認められない。Fig. 8 はこのことを示すための表面観察写真で、同一応力 ($\sigma=255\text{MPa}$) 下で比較したものである。破断へ導く主き裂の発生初期には両負荷形式間にそれほど差はないことがわかる。

Fig. 9 は平滑材の回転曲げにおけるき裂長さと全寿命を基準とした相対繰返し数の関係である。

Fig. 10 は平面曲げの結果を回転曲げと同様に整理したものであり、回転曲げの結果との比較を容易にするため、回転曲げの平均値を破線で示してある。このように平面曲げでも全寿命の多くはき裂伝ば寿命で占められる。平面曲げでは $l-N/N_f$ 関係の応力依存性はほとんどない。 $l=0.1\text{mm}$ となる繰返し数比 $N_{0.1}/N_f$ の値は回転曲げより平面曲げの方が小さい。これは両者で応力が等しい場合、 $N_{0.1}$ の差よりも N_f の差が大きいためである。

3・2・3 き裂伝ば速度の応力依存性 以上述べたように、回転曲げと平面曲げにおける時間強度の差は主にき裂伝ば過程の差に起因している。そこでここで

Fig. 9. Relation between cycle ratio and crack length (rotating bending of smooth specimen).

は、両負荷形式におけるき裂伝ば速度の応力依存性を検討する。

Fig. 11 に小穴材、平滑材の回転曲げおよび平面曲げにおけるき裂伝ば速度と応力の関係を示す。Table III は Fig. 11 から得られた、き裂伝ば速度の応力依存性を示す指数 n と $S-N$ 曲線の有限寿命域を $\sigma^m N_f = \text{一定}$ で近似した場合の時間強度の応力依存性を示す指数 m をまとめたものである。これらの結果からそれ

Fig. 10. Relation between cycle ratio and crack length (plane bending of smooth specimen).

Table III. Index numbers m and n in the relations $N_f \sigma^m = \text{const.}$ and $dl/dN \propto \sigma^n$, respectively.

	Rotating bending		Plane bending	
	Smooth specimen	Holed specimen	Smooth specimen	Holed specimen
n	8.6	8.6	6.7	6.6
m	8.3	7.9	7.3	6.5

それぞれの負荷形式では平滑材、小穴材ともに $n \approx m$ であり、また回転曲げの n, m は平面曲げのそれに比べ多少大きいことがわかる。このことが $S-N$ 曲線の傾きが両負荷形式間で異なることに関係している。 $n \approx m$ となるのは、全寿命 N_f の大部分がき裂伝ば寿命で占められる場合、以下の関係がほぼ成り立つからである。

き裂伝ば寿命 $N_2 - N_1$ をき裂が l_1 から l_2 になるまでの寿命とすれば $N_f \propto N_2 - N_1$ がほぼ成り立つ。また疲労限度以上の応力レベルのもとのき裂伝ばに対して次式が成り立つ。

$$\frac{dl}{dN} \propto \sigma^n l \quad (1)$$

$$\therefore N_2 - N_1 \propto \frac{1}{\sigma^n} \ln \frac{l_2}{l_1}, \quad \therefore N_f \propto \frac{1}{\sigma^n}$$

したがって、時間強度に対して次式が成り立つ。

$$N_f \sigma^n = \text{Const.} \quad (2)$$

式(1)、(2)よりき裂伝ば速度の応力依存性と時間強度の応力依存性がほぼ等しいことになる。

3・3 節に示すように、き裂面形状は、応力レベル

Fig. 11. Relation between crack growth rate and stress.

に無関係にまた平面曲げでも回転曲げでも、表面に沿って測った長さ l が等しければ一意的に決まる。それにもかかわらず、き裂伝ば速度の応力依存性は、平面曲げと回転曲げで異なる。その理由を以下において考える。

Fig. 3 と Fig. 4 を比較すれば、(i) $l \approx 1 \text{ mm}$ 以下のき裂伝ば速度は、応力が小さいときには両者でほぼ等しいが、応力が大きくなると回転曲げの方が平面曲げよりはるかに大きくなることおよび (ii) $l \approx 1 \text{ mm}$ 以上の所で回転曲げのき裂伝ば曲線は上方へ曲る傾向があることがわかる。

すなわち、両負荷形式間でき裂伝ば速度の応力依存性が異なる理由は(i)と(ii)に関係している。(i)は中村ら、鎌田が指摘しているように、主として塑性ひずみの差に起因しているものと思われる。これに対し、(ii)には塑性ひずみの差のほかに Fig. 12 に示す事情が関係していると思われる。Fig. 12 からわかるように、平面曲げと回転曲げで、き裂面形状と応力が同一であっても、き裂がある程度大きくなればA、C点の応力状態は回転曲げの方が厳しい。それは回転によってA、C点が平面曲げにおけるよりも高応力の点を通るからである。すなわち、平面曲げより回転曲げの方がき裂伝ば速度は大きいことになる。また、平面曲げではA点とC点で応力状態が等しいのに対し、回転曲げでは、回転することによりACが水平になった位置でもA点とC点の応力状態は異なり、A点の方が状態が厳しい。それはC点が開口してからA点が開口するからである。このことを反映して、き裂伝ば挙動は Fig. 12, 14 に示すように両負荷形式間でわずかながら異なる。すなわち平面曲げの場合、き裂はき裂発生点を中心にほぼ対称に伝ば拡大するが、回転曲げの場合、

(a) Rotating bending. (b) Plane bending.

Fig. 12. Schematic illustration of fractured surface.

Fig. 13. Relation between crack length and crack depth.

Fig. 14. An example of fractured surface.

Fig. 12 (a) に示すように C 点より A 点側においてき裂伝ば速度が大きい。

3・3 き裂面の形状

回転曲げ試験の場合、小穴材、平滑材ともにき裂面はほぼ半だ円状を呈しながら伝ばする³⁾⁷⁾。Fig. 13 は種々の応力下でのき裂面の形状を、小穴材と平滑材の回転曲げおよび平面曲げとで比較したものである。また Fig. 14 は加熱着色法による破面写真の一例である。き裂長さが約 3 mm までの範囲ではいずれの負荷形式ともに半だ円状で形状比は約 0.4 となり負荷形式の影響は認められない。同図には他の材料の結果も同時に示してある。これからわかるように、き裂面の形状は、き裂があまり大きくない限り、材質、応力レベル、き裂長さに関係なく、また平面曲げでも回転曲げでも、表面に沿ったき裂長さによってほぼ一意に決まる。

4 結 論

本実験の結果から、平滑材および小穴材 (S45C 焼なまし材) の平面曲げと回転曲げにおける時間強度お

よび疲労限度の比較に関して以下のことがいえる。

(1) 両負荷形式において、全寿命の中でき裂発生寿命の占める割合は比較的小さく、かつ応力レベルが等しい場合のき裂発生寿命の差は小さい。したがって、両負荷形式間の時間強度の差は主にき裂伝ば寿命の差に基づいている。

(2) 応力がある程度大きい場合のき裂伝ば速度は、平面曲げにおけるより回転曲げにおいて大きい。この両負荷形式間のき裂伝ば速度の差はき裂長さが ~1 mm 以下のところでは、中村ら、鎌田が指摘しているように塑性ひずみの差に基づいており、~1 mm 以上のところでは、それに加えてき裂面のおかれた力学的条件の相違も関係していると思われる。

(3) 平滑材の疲労限度の値および疲労限度において生じる微視的停留き裂の長さには両負荷形式間でほとんど差がない。これは疲労限度の応力を繰返すとき、すべりが生じる結晶粒の数は限られており、したがって試験片は回転曲げでも平面曲げでも完全弾性体に近い挙動を示すためと思われる。

(4) (3)と同様な理由で、平滑材において応力が低いときのき裂伝ば速度は両負荷形式間でほとんど差はないが、(2)に述べたように、応力が大きくなるとその差は大きくなる。すなわち、き裂伝ば速度の応力依存性は、平面曲げより回転曲げの方が大きい。

(5) S-N 曲線の傾きが、平面曲げより回転曲げにおいて大きいのは、(4)の現象によって説明される。

(6) き裂面形状は小穴材、平滑材ともに半だ円状で形状比は約 0.4 となり、両負荷形式間の差はない。

(7) 平面曲げにおけるき裂伝ば速度は回転曲げと同様にき裂長さに比例するが、この関係の成立するき裂長さの範囲は平面曲げの方が広い。このことから、平面曲げ試験は各種材料のき裂伝ば特性を比較するうえで有効であると思われる。

(昭和57年5月20日 日本機械学会九州支部鹿児島地方講演会；昭和57年11月4日 日本機械学会中国・四国支部・九州支部合同企画熊本地方講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 西谷弘信, 日本機械学会講演論文集, No. 790-13, 63 (1979).
- 2) H. Nisitani, Mechanics of Fatigue-AMD, ASME (Ed. T. Mura), 47, 151 (1981).
- 3) 西谷弘信, 皮籠石紀雄, 日本機械学会論文集, A-49, 431 (1983).
- 4) 中村 宏, 恒成利康, 岡崎章三, 岡田友信, 材料, 27, 721 (1978).
- 5) 鎌田敬雄, 材料, 29, 150 (1980).
- 6) J. M. Lessells, "Strength and Resistance of Metals", 300 (1954) John Wiley & Sons, Inc. New York.
- 7) 西谷弘信, 森光武則, 日本機械学会論文集, 42, 325 (1976).