環状切欠材の疲労強度に及ぼす油環境の影響*

(回転曲げ荷重とねじり荷重)

皮籠石 紀雄*¹, 西谷 弘信*²

Effect of Oil Environment on Fatigue Strength of Specimen with Circumferential Notch (Rotating Bending and Torsion)

Norio KAWAGOISHI and Hironobu NISITANI

In the present paper, the effect of an oil environment on the fatigue strength of specimens with a circumferential notch of annealed 0.34 % C steel is investigated. The fatigue crack growth rates were measured under rotating bending and reversed torsion, in air and in oil. The fatigue strength is increased by rotating bending and is hardly influenced by torsion for the existence of oil. These results are explained considering the two effects on the fatigue crack growth rate: the wedging action of oil and interlocking action.

Key Words: Fatigue, Rotating Bending, Torsion, Oil Environment, Carbon Steel, Fatigue Crack Growth Rate, Wedging Action, Interlocking Action, Fracture Mode

1. 緒 言

一般に、疲労寿命の大部分はき裂伝ば過程で占められ、特に鋭い切欠材においては全寿命のほぼ 100% がき裂伝ば寿命である。したがって、油環境中での疲労強度を考える場合、き裂伝ばに対する油の影響を明らかにする必要がある。

疲労き裂が油環境中で伝ばする場合、引張形（モード I 形）であれば伝ば速度は通常油によるくさび効果のため抑制される^{(1)~(6)}。しかしながら、せん断荷重下で伝ばするき裂に対する油の影響を調べた研究はあまりみられないためその効果については不明な点が多い⁽⁷⁾。

大気中で環状切欠材のねじり疲労試験を行えば、一般にき裂はモード III 形で伝ばした後モード I 形の伝ばに遷移することが知られている^{(8)~(13)}。しかしながらこれまでの研究の多くはモード III 形伝ばを主対象としており、いわゆるファクトリーループ破面を形成するモード I 形伝ばを対象としたものは現象が複雑になるため少ない^{(12)~(14)}。ねじり荷重下でも、負荷応力や材質

によってはき裂伝ば寿命の多くがモード I 形の伝ば期間となること⁽¹⁵⁾を考慮した場合、ねじり荷重下におけるモード I 形のき裂伝ば特性を調べることは重要である。またそのようなき裂伝ばに対する油環境の影響を調べた研究はみられないようである。

本研究は、上記の点を考慮して、大気中と油中で環状切欠材の回転曲げおよびねじり疲労試験を行い、負荷形式が異なる場合のき裂伝ばに対する油の影響を伝ばモードと油の作用の関係から検討したものである。

2. 材料、試験片および実験方法

素材は、市販の機械構造用炭素鋼 S 35 C 圧延丸棒である。表 1 に素材の化学成分を示す。

試験片は、素材を 870°C、30 min 保持後空冷の焼ならしを行ってから図 1 に示す形状、寸法の環状切欠試験片に機械加工した。熱処理後の機械的性質を表 2 に示す。試験片は、機械加工の後 600°C、1h 保持後炉冷の焼なましを行ってから実験に供した。

表 1 化学成分

%				
C	Si	Mn	P	S
0.34	0.25	0.64	0.022	0.009

* 昭和 63 年 4 月 1 日 第 65 期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和 62 年 8 月 10 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、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

き裂長さの測定は、所定の応力繰返しの後、試験片を試験機から取りはずし、切欠部をかまぼこ状に切り出す切断法⁽¹⁶⁾で行った。き裂長さ l は、十文字に切断した切欠底 4 箇所における深さ方向の長さの平均値である。すなわち、伝ば曲線の決定にはプロットした点の数だけの試験片を用いた。ねじりの場合、前述のように、伝ば過程でモード変化が起こるがその場合もき裂長さは試験片軸に直角な方向に測定し、同時にモード変化が起こったときの長さ l_r も測定した。図 2 にき裂長さの定義を示す。

油中における疲労試験は、温度を $20^\circ \pm 1^\circ \text{C}$ に調節した油を切欠部に毎分約 200 cm^3 の割合で滴下させる循環方式で行った。用いた油は、パラフィンオイル 70 である。用いた試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機（容量 $9.8 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、回転数約 57 Hz ）、および曲げねじり疲労試験機（容量 $\pm 4.9 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、繰返し速度約 33 Hz ）である。

3. 実験結果および考察

3.1 疲労強度とき裂形態 図 3 は、回転曲げ荷重下における $S-N$ 曲線である。回転曲げの場合、疲労寿命は油によりかなり増大しているが、増大の程度は応力レベルにより異なっている。すなわち、油による

表 2 機械的性質

MPa.%			
σ_{sl}	σ_B	σ_T	δ
356	571	1202	34.0

(a) 回転曲げ疲労試験片

(b) ねじり疲労試験片

図 1 試験片の形状、寸法 (mm)

(a) 回転曲げの場合 (b) ねじりの場合

図 2 き裂長さの定義

疲労寿命の増大は、くさび効果の応力依存性⁽¹⁾⁻⁽³⁾を反映して、応力レベルの低下とともに大きくなるものの、疲労限度に近づくとも両環境間における寿命差は逆に小さくなっている。これらの傾向は、先に報告した S45C 焼なまし材を用いた平滑試験片⁽⁵⁾や小穴付試験片⁽⁶⁾でも同様に観察された。図 4 は上記の傾向をわかりやすく示すため、切欠材と平滑材⁽⁵⁾の結果をまとめて整理し直したものである。すなわち図 4 において、縦軸は

図 3 $S-N$ 曲線 (S35C の回転曲げ疲労)

図 4 疲労強度に及ぼす油の影響 (破断寿命をそろえたときの両環境中の疲労強度比、切欠材および平滑材⁽⁵⁾の回転曲げ疲労)

図 5 $S-N$ 曲線 (S35C のねじり疲労)

両環境中で破断寿命 N_f が等しくなる応力 σ_a を、大気中のそれを基準とした相対値 $\sigma_a(\text{oil})/\sigma_a(\text{air})$ で表し、横軸には破断寿命 N_f をとったものである。図4中実線は、今回の S35C 切欠材、破線は前回報告した S45C 平滑材⁽⁵⁾における結果である。図4からわかるように、平滑材、切欠材いずれの場合でも、油により疲労強度はかなり上昇するけれども、その上昇の程度はくさび効果の寄与が大きいと考えられる切欠材のほうが大きい。また疲労強度の上昇が最も大きくなるのは、平滑材、切欠材ともに破断寿命 N_f が $5 \times 10^5 \sim 1 \times 10^6$ 回近傍である。

図5は、ねじり荷重下における S-N 曲線である。ねじりの場合、大気中の結果と油中のそれはほぼ1本の直線上に重なっており、両環境下の破断寿命の間にほとんど差異は認められない。このように負荷形式により油の影響が異なることは、油中で作動する機械要素の疲労強度を考えるうえで注意を要することである。

図6は、油中における回転曲げとねじりの疲労限度

で観察された停留き裂の写真である。

回転曲げの場合、大気中では発生したき裂はモード I 形で伝ばしてから停留するのが一般的であるが、このことは油中でも同様に認められる。一方ねじりの場合、発生したき裂は最初軸に直角な方向にモード III 形で伝ばした後、分岐が起こり、モード I 形の伝ばへ変化してから停留している。

疲労限度における停留き裂長さは、回転曲げの場合、大気中の 0.1~0.2 mm に比べ油中では 0.5 mm 前後とかなり長い。これに対しねじりの場合、大気中、油中ともに 0.5 mm 前後であり、環境の影響はほとんど認められない。以上のように、負荷形式によりき裂伝ばモードは異なり、それに伴い停留き裂長さに対する油の影響にも差異が生じる。回転曲げの場合、油中における停留き裂が大気中のそれより長くなることに関して、著者の一人は、平滑材で認められる微視的停留き裂でも同様な傾向を見いだしている⁽¹⁷⁾。また遠藤らは、本実験と類似の環状切欠材 (S35C 焼なまし材、切欠半径 0.4 mm、切欠深さ 0.85 mm) を用いて大気中では認められなかった停留き裂が油中では観察されることを明らかにし、油のくさび効果に起因した現象であることを指摘している⁽¹⁸⁾。

3・2 き裂伝ば挙動 前に述べたように、疲労強度に対する油の影響は負荷形式により異なる。以下ではこの理由についてき裂発生および伝ば過程を大気中と油中で調べることにより検討する。

図7は、回転曲げ荷重下における大気中および油中でのき裂伝ば曲線である。縦軸はき裂長さの対数 $\log l$ 、

図7 き裂伝ば曲線 (S35C の回転曲げ疲労)

図8 き裂伝ば速度とき裂長さの関係 (S35C の回転曲げ疲労)

横軸は破断寿命を基準とした相対繰返し数 N/N_f である (図中 I 印は、切欠底 4 箇所におけるき裂長さのばらつきを示している)。180 MPa の応力下で比較したのは、破断寿命に対する油の影響が最も顕著に認められたからである (図 3)。ここで用いた切欠材の場合、いずれの環境下でも全寿命のほぼ 100% がき裂伝ば過程で占められ、しかもそのほとんどはモード I 形伝ばである。このことから疲労寿命に対する油の影響は、モード I 形伝ばに対する油の影響と考えてよいことになる。

図 8 は、回転曲げの場合のき裂伝ば速度とき裂長さの関係である。いずれの環境下でも、伝ば速度曲線には鋭い切欠材に特有の変曲点⁽¹⁹⁾が存在するが、そのときのき裂長さは大気中より油中のほうが長い。伝ば速度に対する油の影響をみると、き裂発生初期では油による伝ば速度の低下は比較的小さいが、き裂長さが約 0.2 mm 以上になるとくさび効果の増大により油中でのき裂伝ば速度の低下は著しい。また図 7 で示したように、疲労寿命のほとんどが 0.2 mm 以上のき裂伝ば過程で占められるので、この期間におけるき裂伝ばに対する油の影響が両環境下で生じた疲労寿命の差にほぼそのまま反映される。0.2 mm 以下のき裂伝ばに対して、両環境下の差がほとんどないにもかかわらず、疲労限度に多少の差が生じたのは、図 8 に示すように、大気中ではき裂長さ 0.2 mm 程度でき裂伝ば速度の極

小値がみられるのに対し、油中ではき裂長さの 0.5 mm 程度で極小値がみられることによると思われる。このことを反映して停留き裂の長さも前者で 0.1~0.2 mm、後者で約 0.5 mm となっている。

図 9 は、ねじり荷重下におけるき裂伝ば曲線を図 7 と同じように示したものである。ねじりの場合も回転曲げと同様に全寿命のほぼ 100% がき裂伝ば過程で占められている。そして伝ば曲線は両環境下でほぼ重なっており環境の影響はほとんど認められない。なお、ねじりにおける切欠底 4 箇所でのき裂長さのばらつきはき裂形態の複雑さを反映して回転曲げより大きい。ねじりの場合、図 6 で示したようにき裂伝ばにはモード III からモード I への遷移が起こる (図 6 は、停留き裂の場合であるが伝ば性き裂でも伝ばモードの遷移は同様に認められる)。表 3 は、き裂伝ばモードの変化が起こるき裂長さ l_T (定義は図 2) の平均値を $\tau_a=160$, 180 MPa の場合について両環境下で比較したものである。一般に、き裂伝ばモードに変化が起こるときのき裂長さは応力レベルにより異なり、高応力下ではモード III 形、低応力になるとモード I 形が支配的となる⁽¹⁵⁾といわれるが、本実験の負荷応力の範囲ではいずれの環境下でも l_T は約 0.1 mm 程度である。このことと図 9 の結果を考慮すれば、ねじりの場合も回転曲げと同様に全寿命のほとんどがモード I 形伝ばであるといえる。

図 10 は、ねじり荷重下におけるき裂伝ば速度とき裂長さの関係である。油中での伝ば速度は大気中でのそれよりやや大きいとその差はわずかであり、ねじり疲労では伝ば速度に対する油の影響は小さい。

3.3 考察 以上述べたように、回転曲げの場合、大気中、油中ともに全寿命のほぼ 100% がモード I 形のき裂伝ば過程である。またねじりの場合も、モード III 形からモード I 形へ伝ばの遷移が起こるけれども本

表 3 伝ばモードが変化するときのき裂長さ l_T (ねじり疲労)

τ_a MPa		160	180
l_T mm	In air	0.06	0.09
	In oil	0.06	0.08

図 9 き裂伝ば曲線 (S35C のねじり疲労)

図 10 き裂伝ば速度とき裂長さの関係 (S35C のねじり疲労)

実験の範囲では、全寿命のほとんどがモードⅠ形のき裂伝ば過程で占められている。しかし、油の影響は両者で異なり、回転曲げでは油により寿命が増大するのに対し、ねじりでは油の影響はほとんど認められない。

以下では回転曲げでみられる油による顕著な伝ば速度の低下がねじりの場合ほとんど生じない理由について考察する。

図 11 は、油中のねじり荷重下で破壊した試験片の

(a) 巨視的破面

(b-1) モードⅢ形伝ば部

(b-2) モードⅠ形伝ば部

(b) 微視的破面

図 11 破面写真（油中におけるねじり疲労）
($\tau_a = 160 \text{ MPa}$, $N_f = 1.1 \times 10^6 \text{ Cycles}$)

破面写真である。図 11(a) は低倍率写真である。巨視的に平坦なモードⅢ形伝ばの後、星形にモードⅠ形で伝ばしており、ねじり荷重を受ける環状切欠材でみられる典型的なファクトリーループを形成している。図 11(b) は、微視的破面写真であり、モードⅢ形伝ば部とモードⅠ形伝ば部（ファクトリーループ部）の詳細を示している。いずれの破面とも比較的平坦であるが、破断片や二次割れが多く認められ、しかも破面同士の強いこすり合いを示すこん跡が観察される（疲労試験中、強いこすり合いによるファクトリーループ部からの破断片が頻繁に落下するのが観察された）。このようなこすり合いを示すこん跡は、大気中、油中のいずれの場合も破面の多くを占めており、モードⅠ形で一般にみられるストライエーションは本実験では観察できなかった（回転曲げの場合、大気中、油中ともにモードⅠ形の伝ば過程ではストライエーションが観察される）。

以上のことと図 12 からわかるように、ねじりの場合、き裂伝ばには、モードⅢ形でもモードⅠ形でもかみあった 2 面間のこすり合いが関係し、その過程に対して油の有無がほとんど影響しないものと思われる。このように考えれば、ねじり荷重の場合に、油中と空気中の S-N 曲線にほとんど差がないことが理解できる。

4. 結 論

S35C 焼ならし材の環状切欠材を用いて、大気中と油中で回転曲げ疲労試験およびねじり疲労試験を行い、負荷形式が異なる場合のき裂伝ばに対する油の影響を検討した。得られた結論は以下のとおりである。

(1) 回転曲げの場合、油により疲労強度はかなり上昇するが、ねじりの場合、大気中と油中の疲労強度に大きな差異はみられない。

(2) 疲労限度における停留き裂は、回転曲げの場合、大気中での $0.1 \sim 0.2 \text{ mm}$ に比べ油中では約 0.5

(a) モードⅢ形の伝ば (b) モードⅠ形の伝ば

図 12 切欠材のせん断荷重下のき裂伝ば
($\longleftrightarrow$ 軸方向)

mm と長い。これに対しねじりの場合、大気中、油中とも約 0.5 mm で環境の影響はほとんど認められない。

(3) ねじりの場合、本実験の範囲では、き裂伝ばはモード III 形からモード I 形に変化するが、そのときのき裂長さは、大気中、油中ともに約 0.1 mm 程度である。

(4) 回転曲げでもねじりでも、また大気中でも油中でも、全寿命のほとんどがモード I 形の伝ば過程である。

(5) 油中におけるき裂伝ば速度は、回転曲げの場合、大気中のそれより小さく、ねじりの場合、大気中のそれとほぼ等しい。これは回転曲げの場合、主として油によるくさび作用が働いたためであり、ねじりの場合、モード III 形でもモード I 形でも、き裂伝ばの際凹凸のあるき裂面をこすり合わせる必要があり、その過程に油の影響がほとんどないためと思われる。このことと結論(4)が結論(1)の理由である。

終わりに、本実験にご協力された鹿児島大学技官大園義久氏および卒業研究生の熊原猛君、新留一彦君

に感謝します。

文 献

- (1) 遠藤・岡田, 機論, 31-221 (昭 40), 52.
- (2) 遠藤・ほか 2 名, 機論, 37-300 (昭 46), 1497.
- (3) 遠藤, 潤滑, 13-6 (昭 43), 257.
- (4) 岡田・ほか 2 名, 材料, 31-343 (昭 57), 384.
- (5) 西谷・皮籠石, 機論, 52-477, A (昭 61), 1264.
- (6) 西谷・皮籠石, 機論, 52-484, A (昭 61), 2561.
- (7) 皮籠石・西谷, 機論, 53-496, A (昭 62), 2248.
- (8) Tschegg, E. K., *Mater. Sci. Eng.* 54 (1982), 127.
- (9) Queency, R. P., *Int. J. Fatigue*, 5 (1982), 27.
- (10) Ritchie, R. O., ほか 3 名, *Met. Trans.*, 13 A (1982), 101.
- (11) Hurd, N. J. and Irving, P. E., *ASTM Spec. Tech. Publ.*, 761, (1982), 212.
- (12) 中沢・ほか 2 名, 機講論, No. 720-1 (昭 57), 9.
- (13) 真武・ほか 2 名, 機論, 48-433, A (昭 57), 1142.
- (14) 例えば, 中村・ほか 2 名, 機論, 36-292 (昭 45), 1969.
- (15) 例えば, Sudarshan, T. S., ほか 2 名, *Mater. Sci. Tech.*, 3 (1987), 338.
- (16) 国尾・ほか 3 名, 破壊力学実験法, (昭 59), 133, 朝倉書店.
- (17) 後藤・ほか 3 名, 機論, 54-499, A (昭 63), 497.
- (18) Endo, K., and Komai, K., *JSME, 1967, Semi, Int. Sympo. Papers*, 1 (1967), 112.
- (19) 小林・ほか 2 名, 機論, 36-288 (昭 45), 1238.

討 論

〔質問〕 岡田 庸 敬・服部 修 次
(福井大学工学部)

油中の疲労強度およびき裂進展の詳細な研究に敬意を表す。

回転曲げの場合、き裂の中の油はくさび作用として物理的に影響するので油の種類によってあまり差はないと思われるが、ねじりの場合き裂面がこすり合うの

で油の潤滑性能の違いが現れるのではないか。

〔回答〕 本材料の場合、図 12 に示すようにき裂伝ばの際、凹凸のあるき裂面がかみあうため油の有無はほとんど関係しなかったものと考えている。しかしながら、すべり特性やき裂面の状態が異なる材料では油の影響も無視できなくなり、ご指摘の点も関係する可能性がある。