微小穴材の疲労限度と微小き裂伝ば則に
及ぼす油粘度の影響*後 藤 真 宏^{*1}, 西 谷 弘 信^{*2}
柳 川 恭 広^{*3}, 宮 川 浩 臣^{*1}The Effect of Oil Viscosity on the Fatigue Limit of Drilled Specimens
and Small-Crack Growth LawMasahiro GOTO, Hironobu NISITANI,
Yasuhiro YANAGAWA, and Hiroomi MIYAGAWA

Rotating bending fatigue tests of plain specimens with a small blind hole were carried out in order to evaluate the effect of oil viscosity on the fatigue limit and small-crack growth law, under the environments of four kinds of base oils. In the present experiments, although the effect of the oils on the fatigue limit is hardly observed, the small-crack growth law, $dl/dN = C_1 \sigma_a^2 l$, is affected by the viscosity. That is, the value of n tends to increase with an increase in the viscosity: $n \cong 8$ in air, $n \cong 10$ in lower-viscosity oils and $n \cong 11$ in higher-viscosity oils.

Key Words: Fatigue, Fatigue Limit, Carbon Steel, Plain Specimen, Rotating Bending, Oil Environment, Small-Crack Growth Law, Viscosity

1. 緒 言

機械要素は、一般に油中あるいは油を塗布した状態で使用されることが多いため、油中における平滑材の疲労被害を調べた研究は、これまでに数多く報告されている^{(1)~(5)}。

一方、油は部材の使用環境、運転状態などに応じてその性状（油の種類）を選択するのが普通である。したがって、性状の異なる油中における疲労寿命を把握することは実用上も必要であると思われる。

著者らは、これまで油中における平滑材の回転曲げ疲労試験を行い、き裂発生には油の影響があまり認められず、き裂伝ば過程でその影響が顕著となる（油中ではき裂伝ば速度が減少する）ことを報告した^{(4)~(7)}。

本論文では、粘度の異なる4種類のパラフィン系基油を用いて、微小穴をもつS35C焼なまし材の回転曲げ試験を行い、疲労限度および微小き裂伝ば則に及ぼす油粘度の影響を検討する。微小き裂伝ば則と油粘度の関係を明らかにすることは、性状の異なる油環境

下で使用される部材の疲労寿命を近似的に評価する際に有益と考えられる。

2. 使用材料・試験片・供試油および実験方法

素材は市販のS35C圧延丸棒（直径約26mm）であり、それに870°C、1hの焼なましを行った。表1に本材料の化学成分を、表2に熱処理後の機械的性質を示す。

図1に試験片の形状および寸法を示す。試験片製作後、600°C、1hの応力除去焼なましを行った。さらに、表面を電解研磨によって直径で約40μm程度取り除いた後、試験片中央部の表面に図2に示す直径・穴深

表1 化学成分 (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.34	0.34	0.74	0.012	0.016	0.01	0.02	0.10

表2 機械的性質

MPa			%	Hv *
σ_{SI}	σ_B	σ_T	ψ	
306	546	952	56.4	150

* Vickers hardness (Load: 9.8N)

* 昭和63年7月13日 九州支部鹿児島地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年1月8日。

^{*1} 正員、大分大学工学部（〒870-11 大分市旦野原700）。

^{*2} 正員、九州大学工学部（〒812 福岡市東区箱崎6-10-1）。

^{*3} 学生員、大分大学大学院。

とともに 0.1 mm の微小穴を加工して実験を行った。

用いた試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機（容量：14.7 N・m, 3 000 rpm）である。

表面の疲労被害の観察およびき裂長さの測定は、所定の繰返し数ごとに採取したレプリカに真空中で金を蒸着したものについて金属顕微鏡（×400）によって行った。き裂長さは、表面に沿って測った円周方向の長さをとり、応力は微小穴の存在を無視した試験片最小断面部の公称応力で表すものとする。

油中における疲労試験は、試験片中央部に流量約 450 cm³/min の割合で連続的に油を滴下する循環方式で行った。表 3 に供試油の性状を示す。使用した油は、狭域分子量分布で粘度の異なる 4 種類のパラフィン系基油（P 30, P 60, P 150, P 500）である。また、いずれの場合も油温は 30°C（±1°C）にて実験を行った。

3. 実験結果および考察

著者らは先に 4 種類のパラフィン系基油（P 35, P 60, P 150, P 500）を用いて、S 35 C 焼なまし平滑材の油中における疲労試験を行い、次のような結論を得た⁽⁵⁾。

(1) 疲労限度 σ_w はいずれの油中でも大気中より

表 3 供試油の性状

Oil	Specific gravity, 15/4 °C	Kinematic Viscosity $\times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$	
		40 °C	100 °C
P 35	0.844	2.4	1.0
P 60	0.863	7.8	2.2
P150	0.866	31.4	5.2
P500	0.877	106	11.4

図 1 試験片の形状と寸法

図 2 微小穴の形状と寸法

増加する傾向にあるが、その増加はわずか（5 %程度）である。また、 σ_w は発生した微視的き裂の停留限界で決まる。

(2) 同一応力下では表面の被害の程度（言い換えれば、すべり帯の発生密度）は大気中・油中ともほぼ同じである。

(3) (2)と関連したことであるが、1 結晶粒程度のき裂発生寿命に油の影響はあまり認められない。

(4) 破断寿命 N_f は油中のほうが大気中より大きく、油中では粘度の大きい油ほど N_f が大きい。また、全寿命の大部分がき裂の伝ば寿命で占められ、その中でも 1 mm 以下の微小き裂の伝ばが支配的である。

そこで今回は、微小穴をもつ試験片の疲労限度に及ぼす油粘度の影響を調べるとともに、微小き裂伝ば則 $dl/dN = C_1 \sigma_a^2 l$ と油粘度の関係を明らかにする。

3.1 微小穴材の疲労限度に及ぼす油粘度の影響

図 3 に各種環境下の $S-N$ 曲線を示す（煩雑さをさけるため、大気中のデータは曲線のみで示す）。このように、疲労限度には油の影響はほとんど認められない。しかし、先に報告した平滑材の $S-N$ 曲線と同様、有限寿命域の破断寿命は大気中より油中のほうが大きく、粘度の大きい油ほどその効果は大きい傾向にある。

図 4 に、疲労限度の応力 σ_w を 10^7 回繰返し後の穴縁近傍の顕微鏡直接写真を示す。いずれの環境下でも穴を起点とした停留き裂が認められ、疲労限度はき裂の停留限界で決まっている。また、同一応力下（ $\sigma_w = 205 \text{ MPa}$ ：大気中, P 35, P 150, P 500）のすべり帯の発生状況に差はあまり認められない。

図 5 は、き裂が停留する場合のき裂伝ば曲線を示している。いずれの場合も穴縁から発生したき裂はある程度伝ばした後は、繰返しとともに伝ば速度を限少し停留に至るが、大気中に比べ油中では停留が急に起こる傾向が認められる。一方、停留時期をみると、環境による差はあまり認められない。また、停留時期は $S-N$

図 3 各種環境下における微小穴材の $S-N$ 曲線（回転曲げ）

曲線(図3)の折れ点の位置とほぼ対応している。

以上のように、破断寿命が油の影響を強く受けるのに対し、疲労限度に油の影響がほとんど認められないのは、すでに報告⁽⁶⁾したように、(1) き裂発生に油の影響がほとんどないことに加え、(2) 停留き裂では伝ば性のき裂に比べき裂内への油の侵入がより困難になるため、くさび作用⁽⁸⁾の寄与が小さいと考えられること、さらに、(3) 油による大気遮断により腐食作用は防がれる(これはき裂伝ば速度を減少させる方向に働く)反面、フレッティング酸化物の生成は抑制される(これはき裂伝ば速度を増加させる方向に働く)ことなどが関係しているものと考えられる。例えば、Tzou⁽⁹⁾らは、Cr-Mo鋼の油中における疲労試験を行い、低き裂伝ば速度領域の酸化物厚さが油中に比べて大気中では特に大きいことを指摘している。

3・2 微小き裂伝ば則に及ぼす油粘度の影響 著者らはこれまで、各種炭素鋼の大気中における疲労試験を行い、微小き裂のき裂伝ば速度 dl/dN が $\sigma_a l$ により一義的に決まることを示した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。さらに、 $\sigma_a l$ と引張強さに基づく簡便な疲労寿命予測式を提案し、それを金属材料技術研究所データシートに適用し、その有効性を確認した⁽¹²⁾。一方、特定の油の場合、油中で

も微小き裂の dl/dN が $\sigma_a l$ により決まることを示したが⁽⁴⁾、普通油は使用状況によりその性状を変えて使うため、油中での疲労寿命を評価する際、油性状の影響を考慮する必要がある。ここでは、微小き裂伝ば則と油粘度の関係に注目して油性状の影響を検討する。その際、小穴材ではき裂発生後しばらくの間は、き裂が穴の影響を受けながら伝ばするため、穴の影響をほとんど受けなくなると考えられる $l > 0.3 \text{ mm}$ のき裂をとりあげ、伝ば挙動を観察する。

図6は、き裂が0.3 mmに達してから破断するまでの繰返し数 $N_f - N_{0.3}$ と応力の関係である。

図7は、図6を基に各種油中の $N_f - N_{0.3}$ の大気中

図5 停留き裂の伝ば曲線

図6 き裂が0.3 mmに達してからの寿命 $N_f - N_{0.3}$ を基準としたときの $S-N$ 曲線

図7 $(N_f - N_{0.3})_{oil} / (N_f - N_{0.3})_{air}$ と σ_a の関係

図4 疲労限度の応力を 10^7 回繰返したときの穴縁近傍の顕微鏡直接写真

に対する比 $(N_f - N_{0.3})_{oil} / (N_f - N_{0.3})_{air}$ と応力レベルの関係を調べたものである。き裂伝ばに対する延命効果は粘度の大きい油で大きく、疲労限度近傍を除けば応力が小さいほど油の作用が大きく現れている。

図8に、応力一定 ($\sigma_a = 240$ MPa) のもとにおける各種環境下のき裂伝ば曲線を示す。大気中と比べて油中の dl/dN は小さく、粘度の大きい油ほど dl/dN が小さくなる傾向が認められる。また、P 35 と P 60 では両者の伝ば曲線はほぼ一致する (他の応力レベルでも同じ結果が得られた)。

油の粘性がき裂伝ばに与える力学的作用 (くさび作用) については、これまでにいくつかの解析^{(13)~(15)}が行われており、粘度の大きい油ほどき裂の閉口過程においてき裂先端の実応力の減少が大きくなることが示されている。一方、き裂内に油が侵入すれば、圧縮過程 (つまり除荷過程) では油はき裂にはさまれた薄膜として存在しうが、き裂伝ばに対して影響の大きい引張過程ではき裂先端付近で油膜の破断⁽¹⁶⁾が起こる可能性がある。そのときは、油は開口に対して十分に抵抗することができない。このことが、P 35 と P 60 で

図8 各種環境下の同一応力レベル ($\sigma_a = 240$ MPa) のもとでのき裂伝ば曲線

図9 $\ln l - (N - N_{0.3}) / (N_f - N_{0.3})$ の関係

は粘度が異なるにもかかわらず、油の作用にほとんど差がなかったことに関係していると思われる。粘度の大きい油 (P 150, P 500) では、粘度の小さい油に比べて油膜の破断が起こり難いと思われ、破断が起こらなければ油が開口を防げる効果は大きく、油ごとの差が現れやすいと考えられる。

図9に、 $N_f - N_{0.3}$ を基準としたときの相対繰返し数 $(N - N_{0.3}) / (N_f - N_{0.3})$ とき裂長さの対数 $\ln l$ の関係を示す。両者の関係は、環境の影響をほとんど受けずほぼ1本の曲線で近似できる [各環境ごとに $\ln l$ と $(N - N_{0.3}) / (N_f - N_{0.3})$ の関係を調べたところ、両者の関係は応力レベルにもほとんど影響されなかった]。また、 $N_f - N_{0.3}$ の65%程度が1 mm以下の微小き裂の伝ば寿命で占められ、そのようなき裂長さの範囲では、両者の関係は近似的に直線で表せる。すなわち、微小き裂の dl/dN はき裂長さ l に比例する。

図10にき裂長さを一定 ($l = 0.5$ mm) としたときの各種環境下における dl/dN の応力振幅依存性を調べた結果を示す。いずれの場合も、両者の間には近似的に直線関係が認められる。すなわち、 dl/dN は σ_a^n に比例する。 n の値は大気中で約8となるのに対し、P 35 および P 60 では約10、P 150 では約10.5、P 500 では約11となり、粘度の影響が認められる。

結局、図9と図10から油中でも微小き裂の dl/dN は次式により決まることになる。

$$\frac{dl}{dN} = C_1 \sigma_a^n l \quad \begin{cases} n \cong 10 & (\text{P 35, P 60}) \\ n \cong 10.5 & (\text{P 150}) \\ n \cong 11 & (\text{P 500}) \end{cases}$$

図11に、 $dl/dN - \sigma_a^n l$ の関係を示す。いずれの環境下

図10 各種環境下における dl/dN の σ_a 依存性 ($l = 0.5$ mm の場合)

図 11 dl/dN - σ_a^2l の関係

でも dl/dN と σ_a^2l は 1 対 1 に対応しており、油中でも応力拡大係数による整理が困難な微小き裂に対して σ_a^2l が有効である。また、大気中では $dl/dN < 10^{-6}$ mm/cycle の範囲では σ_a^2l による整理が困難となるが、油中では 10^{-7} mm/cycle 程度の dl/dN でも σ_a^2l と良く対応している。これには、油中ではフレッティング酸化物の生成が抑制されることが関係していると思われる。巨視的き裂でも、油中の ΔK_{th} が大気中より減少することが報告されている⁽⁹⁾。

4. 結 論

微小穴(穴径・穴深さとも 0.1 mm)を有する S 35 C 平滑材の油中における回転曲げ疲労試験を行い、疲労限度および微小き裂伝ば則に及ぼす油粘度の影響を検討した。得られた主な結論を以下に示す。

(1) 微小穴材の疲労限度は油の影響をほとんど受けない。また、疲労限度の応力の繰返し後には穴を起点とする停留き裂が認められる。停留き裂の停留時期は大気中と油中であり差は認められず、S-N 曲線

の折れ点の位置とほぼ対応している。

(2) 微小き裂伝ば挙動は油の影響を受け、一般に高粘度の油ほどき裂伝ば速度 dl/dN は小さい。また、微小き裂の dl/dN は σ_a^2l によって一義的に決まり、 n の値は大気中で約 8 となるのに対し、油中ではこれより大きく粘度の大きいほど n の値は大きくなる(本実験の範囲では $n=10\sim11$)。

(3) 有限寿命域では油の効果が大きいにもかかわらず、疲労限度にはほとんど差が生じないのは、停留き裂では伝ば性のき裂に比べてくさび作用がほとんど期待できないことに加え、大気遮断は害作用と延命作用の相反する効果をもつためと思われる。

最後に、実験に協力いただいた大分大学工学部技官 三浦篤義氏および本学卒研究生 ウォン・ヘン・ペン、松田裕一両君に感謝する。

文 献

- (1) Frost, N. E., *NEL Rep.*, No. 89 (1963).
- (2) Galvin, G. D. and Naylor, H., *Proc. ICM*, 179, Part-1 (1964), 857.
- (3) Endo, K. and Komai, K., *JSME 1967 Semi-Int. Symp. Papers*, 1 (1967-9), 112.
- (4) 西谷・皮龍石, 機論, 52-477, A (昭 61), 1264.
- (5) 後藤・ほか 3 名, 機論, 54-499, A (昭 63), 497.
- (6) 西谷・皮龍石, 機論, 52-484, A (昭 61), 2559.
- (7) Goto, M., ほか 2 名, *Proc. 6th Int. Colloquium Ind. Lubr.*, 2 (1988), 16.2-1.
- (8) 遠藤・岡田, 機論, 31-221 (昭 40), 52.
- (9) Tzou, J. L., ほか 2 名, *Acta. Met.*, 33-1 (1985), 105.
- (10) Nisitani, H. (Mura, T. 編), *Mechanics of Fatigue AMD*, 47 (1981), 151, ASME.
- (11) Nisitani, H. and Goto, M. (Miller, K. J. and de los Rios, E. R., ed.), *The Behaviour of Short Fatigue Cracks*, (1986), 461, EGF.
- (12) 西谷・ほか 2 名, 機論, 53-496, A (昭 62), 2238.
- (13) 遠藤・ほか 2 名, 機論, 37-300 (昭 46), 1497.
- (14) Tzou, J. L., ほか 3 名, *Acta. Met.*, 33-1 (1985), 117.
- (15) 小島, 機論, 52-483, A (昭 61), 2500.
- (16) 曾田, 固体の摩擦と潤滑, (昭 36), 288, 丸善.