小穴をもつ S 45 C 焼なまし材の疲労限度に
及ぼす油環境の影響*

西谷 弘 信**, 皮籠石 紀 雄***

Effect of Oil Environment on Fatigue Limit of Annealed 0.42 % C
Steel Specimen with a Small Hole

Hironobu NISITANI and Norio KAWAGOISHI

Rotating bending fatigue tests were carried out on specimens with a small blind hole of annealed 0.42 % C steel in air and in oil. Although the fatigue strength at a stress level above the fatigue limit in oil is higher than that in air, the fatigue limit is roughly equal in both environments. This phenomenon is explained from the fact that an oil environment has two effects on crack growth due to the exclusion of moisture and oxygen which oppose each other, that is, the suppression of corrosion and fretting oxide.

Key Words: Fatigue, Oil Environment, Carbon Steel, Rotating Bending, Fatigue Limit, Non-propagating Crack

1. 緒 言

一般に機械要素は油中で作動することが多いので油中での疲労挙動の解明も重要な課題の一つである。

油中での疲労に関するこれまでの研究によると、油環境により疲労寿命は増加する場合と減少する場合がある^{(1)~(3)}。それゆえ油中での疲労強度を考える場合、このような延命効果と害作用の原因を明らかにする必要がある。

先に著者らは、S 45 C 焼なまし材の平滑材を用いて表面の連続観察を行い、疲労き裂の発生および伝ば過程（平滑材を用いているので必然的に高応力下におけるき裂伝ばを対象としている）に及ぼす油環境の影響を大気中での結果との比較のもとに検討した⁽⁴⁾。それによると油中の場合、有限寿命域では主として油による大気遮断効果およびくさび効果に基づく微小表面き裂の伝ば抑制が起こり、その結果疲労強度は上昇した。これに対し疲労限度は、大気中と油中では大きな差は生じなかった。

今回は、小規模降伏条件が満たされるような低応力

下でのき裂伝ば挙動の観察が容易な小穴材を用いて、大気中と油中で疲労試験を行い低応力下におけるき裂伝ばおよび疲労限度におけるき裂の伝ば停留挙動を両環境下で比較し、き裂伝ばに対する油の延命作用と害作用を検討し、小穴材の疲労限度に及ぼす油環境の影響について考察した。

なお、疲労限度に及ぼす油の影響は、平滑材と小穴材とではほぼ同様であるため、小穴材の疲労限度を検討することにより、平滑材の疲労限度の特性も推定できる。

2. 材料、試験片および実験方法

素材は、市販の S 45 C 圧延丸棒であり、それを 840°C、1 h の焼なましを行った後、図 1 に示す形状、寸法の試験片に機械加工した。

素材の化学成分および熱処理後の機械的性質をそれぞれ表 1, 2 に示す。

試験片は、機械加工の後 600°C、1 h の焼なましを行い、さらに加工影響層を除去し、表面観察を容易にするため直径で約 50 μm 電解研磨してから実験に供した。なお、疲労限度以下の応力におけるき裂伝ば試験は、過大応力 ($\Delta\sigma=560\text{ MPa}$) で約 1 mm の予き裂導入後行った。き裂長さとしては、表面に沿って測った

* 昭和 61 年 10 月 7 日 第 64 期全国大会講演会において講演、原稿受付 昭和 61 年 3 月 28 日。

** 正員、九州大学工学部 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*** 正員、鹿児島大学工学部 (〒890 鹿児島市郡元 1-21-40)。

円周方向の長さ(小穴径も含む)をとり、その測定にはレプリカ法を用いた。

応力レベルを表す記号として、応力振幅 σ_a 、応力幅 $\Delta\sigma$ を用いる ($\Delta\sigma=2\sigma_a$)。

油中における疲労試験は、試験片の小穴部に流量約 200 cc/min の割合で油(温度 $30\pm1^\circ\text{C}$)を滴下させる循環方式で行った。用いた油は、日石無添加タービンオイル 32 である。

用いた試験機は、小野式回転曲げ疲労試験機(容量 98 N·m, 回転数約 3400 rpm)である。

3. 実験結果および考察

3.1 S-N 曲線 図 2 に大気中および油中における小穴材の S-N 曲線を示す。図 2 中には、前回報告した部分切欠材(き裂の観察を容易にするため浅い部

表 1 化学成分

	C	Si	Mn	P	S
%	0.42	0.27	0.81	0.013	0.016

表 2 機械的性質

	σ_{Si}	σ_B	σ_T	ψ
MPa, %	377	659	1190	54.0

図 1 試験片の形状、寸法(mm)

図 2 S-N 曲線

分切欠を有するが切欠係数は小さく、実質的には平滑材とみなせる。したがって以下では平滑材とよぶ)の結果⁽⁴⁾も破線で示してある。

平滑材の結果と同様小穴材の結果でも、有限寿命域の疲労強度は油により上昇しており特に $10^5 \sim 10^6$ 回の領域で寿命の増加が大きい。これに対し疲労限度は、平滑材、小穴材ともに多少油中のほうが高いが大きな差はない。

なお、油による寿命増加は、小穴材より平滑材のほうが大きい。これはき裂伝ば速度の抑制効果はき裂長さが 0.5 mm 以下で特に大きい⁽⁴⁾ことに起因しているものと考えられる。

3.2 き裂伝ば曲線 図 3 に、き裂伝ば速度とき裂長さの関係を示す。図 3 には比較として、前報の高応力下における結果⁽⁴⁾も曲線のみで示してある。大気中の結果と同様、油中におけるき裂伝ば速度のき裂長さ依存性も応力レベルにより異なり、高応力レベルでは $dl/dN \propto l$ 、低応力レベルでは $dl/dN \propto l^2$ となっている。

大気中の場合、多くの材料でき裂伝ば速度は高応力下では $dl/dN \propto \sigma_a^n l$ 、小規模降伏条件が満たされるような低応力下では $dl/dN \propto \Delta K^m$ で示される⁽⁵⁾⁻⁽⁸⁾。また油中においても、き裂の初期伝ば過程 ($l < 0.5 \text{ mm}$)を除けば、高応力下でのき裂伝ば速度は大気中と同様 $dl/dN \propto \sigma_a^n l$ で示される⁽⁴⁾。ただし n の値は、油中で約 10 となり大気中の約 8 より大きい。

図 4 は、油中におけるき裂伝ば速度と応力拡大係数 ΔK の関係である。油環境下でも、高応力下の場合、 ΔK は有効でないが、 $\Delta\sigma=382, 353 \text{ MPa}$ の場合からわかるように、低応力下ではき裂伝ば速度は ΔK により一義的に決まる ($dl/dN \propto \Delta K^m$; $m=4$)。なお、パ

図 3 dl/dN と l の関係(小穴材)

ラメータ $\sigma_a^2 l$, ΔK の適用範囲は, 大気中の結果と同様である ($\sigma_a > 0.6\sigma_{st}$ では $\sigma_a^2 l$, $\sigma_a < 0.5\sigma_{st}$ では ΔK , σ_{st} : 降伏応力)^{(5)~(8)}.

図5は, 大気中および油中におけるき裂伝ば速度の応力依存性を, き裂長さ $l=3\text{ mm}$ で比較したものである。油中におけるき裂伝ば速度は, 大気中のそれより小さくなるがその差は応力レベルが低いほど大きくなっている。そしてき裂伝ば速度の応力依存性は, 低応力レベルでは両環境とも $dl/dN \propto \sigma_a^4$, 高応力レベルでは大気中で $dl/dN \propto \sigma_a^{3.2}$, 油中で $dl/dN \propto \sigma_a^{10}$ である。

図6に, 加熱着色法により求めた大気中および油中

図4 油中における dl/dN と ΔK の関係

図5 dl/dN と σ_a の関係

における伝ば性き裂の長さや深さの関係を示す。き裂は, 油中のほうが多少浅い傾向を示しているがその差は小さく, この範囲では, 油の影響はほとんどないものと考えられる。き裂面の形状比は約0.42である。比較のため図7に停留き裂におけるき裂面形状を示す(これは液体窒素中でぜい性破壊させたもの)。停留き裂の形状比は伝ば性き裂のものと同様である。

以上は, 油環境の影響を伝ば性き裂について検討したものであるが, 次に小穴材の疲労限度におけるき裂の停留挙動に及ぼす油の影響を検討する。

図8は, 疲労限度におけるき裂の伝ば曲線である。小穴縁より発生したき裂の伝ば速度は徐々に減少し, 約 $5 \sim 6 \times 10^6$ 回付近でほぼ停留している。この停留現象および停留時期には環境の影響はみられず, さらにき裂が停留する繰返し数は S-N 曲線(図2)の折れ点におけるそれとほぼ等しい。

図6 き裂長さとき裂深さの関係

(a) 大気中

(b) 油中

図7 停留き裂の破面写真

応力レベルが低いほど油中のき裂伝ば速度は抑制されるという今回の結果(図5)および大気遮断効果によるき裂伝ば速度の抑制は、き裂が短いところで特に大きい前報の結果⁽⁴⁾を考慮した場合、微小き裂の伝ば限界である疲労限度も上昇することが予想され、実際遠藤らは、S35C炭素鋼焼なまし材の切欠材(切欠半径0.4 mm, 切欠深さ0.85 mmの環状切欠)を用いて回転曲げ疲労試験を行い、大気中に比べ油中の疲労強度は上昇し、疲労限度もかなりの上昇を示すこと、さらに大気中では認められなかった停留き裂が油中では存在する($l_{npc}=0.28$ mm)ことを確認している⁽⁹⁾。ところが今回の微小表面き裂の結果では、疲労限度は見掛け上油の影響をほとんど受けない(図2)。

以下では、油環境により、有限寿命域における疲労強度はかなり上昇するにもかかわらず疲労限度はあまり上昇しない理由について考える。

有限寿命域における疲労寿命の増大は、くさび作用や大気遮断効果によりき裂伝ば速度が低下すること(図3)によると思われる。

一方、油中での疲労限度が大気中のそれに比べわずかしこ上昇しなかった背景として以下のことが関係しているものと考えられる。

(1) き裂発生に対する油環境の影響はほとんどないこと。

(2) 微小表面き裂の伝ばに対して、油は主として大気遮断効果として作用し、くさび効果の寄与は小さいものと考えられる⁽⁴⁾が、停留き裂の場合、伝ば性き裂に比べくさび効果はさらに小さいこと。

(3) き裂の停留過程において、油による大気の遮断はき裂伝ばに対する延命効果と害作用の相反する二つの効果を有すること。

(1)は、前報で示したように、高応力下における結果では、き裂発生過程(一結晶粒程度のき裂発生)に油環境の影響はほとんどみられなかった⁽⁴⁾ことから推定される。このことは、停留き裂寸法が1～数結晶粒径

程度である平滑材の場合特に重要な点であり、平滑材では油による疲労限度の上昇はあまり期待できないことを意味している(図2に示すように平滑材の場合も疲労限度は、両環境下でほぼ等しい)。

(2)は、著者の一人がこれまでに指摘してきたように、き裂が停留に近づくとともに開口量が減少していく⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾ことに関連していると思われる。すなわち、停留き裂ではき裂内への油の浸入が困難になるため、き裂が停留する過程におけるくさび効果の寄与は小さいものと考えられる。

(3)は、油による大気遮断は腐食作用を防ぐことによりき裂伝ばを遅らせる効果を持つがそれと同時に、大気が遮断されることによりフレッティング酸化物生成も抑制されその結果き裂開口応力の低下に基づくき裂伝ばを早める作用が生じることから予想される。

以下に示す研究は、上記要因のうち3番めの効果と特に強く関係しているものと考えられる。

Cr-Mo鋼を用いた油中疲労試験の結果によると、油中でも大気中と同様き裂伝ば速度は ΔK により一義的に決まるが、高伝ば速度域($dl/dN > 10^{-9}$ m/cycle)においては油中のき裂伝ば速度は大気中(相対湿度30%)のそれより低いのにに対し、低伝ば速度の領域では逆に油中のき裂伝ば速度が大きく ΔK_{th} も約20%以上低いこと、またそのときのき裂面の酸化物厚さは、大気中では油中より厚く、特に大気中のき裂伝ば下限界近傍で酸化物の付着が顕著であることが明らかにされている⁽¹²⁾。

以上のことから、見掛け上疲労限度に対する油の影響がわずかしこ認められなかったのは、き裂発生に対し油環境はほとんど影響しないことやくさび効果の寄与は小さいことに加え、油による大気遮断効果に基づく延命作用(腐食の抑制)と害作用(フレッティング酸化物生成の抑制)がお互いに相殺されることに関係していると思われる。

4. 結 論

S45C小穴材の回転曲げ疲労試験を行い、低応力下および疲労限度におけるき裂の伝ば挙動に及ぼす油の影響を調べ、油の延命効果と害作用について検討した。得られた結論は次のとおりである。

(1) 油により有限寿命域における疲労強度は上昇するが、疲労限度は大気中のそれとわずかしこ変わらない。

(2) 油中においても、大気中と同様に停留き裂が観察され、しかも両環境下でき裂が停留する時期もほぼ等しい。

図8 停留き裂の伝ば曲線

(3) き裂長さ 3 mm の所で比較した場合、油によりき裂伝ば速度は低下するが、その抑制の程度は応力レベルが低いほど大きい。

(4) 油中においても、き裂伝ば速度は大気中と同様に、高応力下 ($\sigma_a > 0.6\sigma_{sl}$) では $\sigma_a^n l$ 、低応力下 ($\sigma_a < 0.5\sigma_{sl}$) では ΔK で一義的に決まる (σ_{sl} : 降伏応力)。

(5) 油は、大気遮断に起因する延命作用 (腐食の抑制) と害作用 (フレッティング酸化物生成の抑制) のき裂伝ばに対する相反する効果を有するものと思われる。このことが両環境下で疲労限度に差が生じなかった理由の一つだと考えられる。

文 献

- (1) 遠藤, 潤滑, 13-6 (昭 43), 257.
- (2) 遠藤・ほか 3 名, 機論, 38-307 (昭 47), 452.
- (3) 岡田・ほか 2 名, 材料, 31-343 (昭 57), 383.
- (4) 西谷・皮龍石, 機論, 52-477, A (昭 61), 1264.
- (5) 西谷・ほか 2 名, 機論, 50-449, A (昭 59), 23.
- (6) 西谷・ほか 2 名, 機論, 51-464, A (昭 60), 1017.
- (7) 西谷・皮龍石, 機論, 51-471, A (昭 60), 2560.
- (8) 西谷・後藤, 機論, 52-474, A (昭 61), 384.
- (9) Endo, K. and Komai, K., JSME 1967 Semi. Int. Symp. Papers, 1 (1967), 112.
- (10) 西谷・高尾, 材料, 23-244 (昭 49), 69.
- (11) 西谷・高尾, 機論, 40-338 (昭 49), 2725.
- (12) Tzou, J. L., ほか 2 名, Acta Met., 33-1 (1985), 105.