表面仕上げが異なる S 45 C 平滑材の疲労過程*

西谷 弘 信**, 今井 良 一***

Comparison of Fatigue Processes in 0.45 % C Steel Specimens Polished
under Different Conditions

by Hironobu NISITANI and Ryoichi IMAI

Rotating bending fatigue tests were made on the specimens which were polished longitudinally or circumferentially by two kinds of silicon carbide papers and then electro-polished.

The fatigue processes were observed successively by the two stage plastic replica method, with special attention being given to the starting points of final fracture.

The materials used are a normalized S 45 C steel, and a quenched and tempered S 45 C steel.

The main results obtained are as follows.

- 1) Non-propagating micro-cracks are observed on the surfaces of specimens after 10^7 cycles of fatigue limit.
- 2) The characteristics of the change in surface states due to stress repetitions can be explained based on the notch sensitivity of the material and the roughness of the specimen surface.

Key Words: Fatigue, Carbon Steel, Surface Finish, Electro-Polishing, Fatigue Processes, Crack, Replica

1. 緒 言

著者らは先に、機械構造用炭素鋼 S 45 C およびクロムモリブデン鋼 SCM 435 の熱処理材を用い、ペーパー研磨による表面仕上げ状態と回転曲げ疲労強度との相関関係を検討した⁽¹⁾⁽²⁾。さらにこれら熱処理材の回転曲げ疲労過程を電解研磨材の表面において連続観察した⁽³⁾。

ペーパー研磨のような実際の加工による表面をもつ機械部品の疲労挙動を支配する因子を、表面状態の変化の観察を通じて検討した例は少ないようである。

たとえ同一材料であっても、表面仕上げ状態が異なれば疲労挙動は異なる。また、特に炭素鋼の場合、素材が同一でも熱処理が異なれば、機械的性質および疲労挙動が大きく異なる。したがって表面仕上げ方法および材質が種々異なる実用材料について、疲労過程における表面状態の変化を明らかにすれば、合理的な材質選定および適正な表面仕上げを行う上で重要な知見が得られるものと思われる。

本論文では以上の点を考慮して、素材が同じ機械構造用炭素鋼 S 45 C で、熱処理が異なる焼ならし材と焼入れ焼もどし材を取り上げた。表面仕上げ状態としては、ペーパー研磨によって表面粗さおよび研磨方向を変えた。そして、そのような試験片を観察しやすいように軽く電解研磨してから回転曲げ疲労試験を行い、表面仕上げ状態および材質が異なる材料の疲労過程における特性を比較検討した。

2. 使用材料、試験片および実験方法

素材は機械構造用炭素鋼 S 45 C 圧延丸棒(直径 19 mm)である。この素材に表 1 に示す熱処理を行ってから試験片を製作した。表 1 の 2 種類の熱処理材を以下 CN 材、CT 材と呼ぶ。熱処理時の直径は CN 材で 19 mm、CT 材で 16 mm である。CN 材ならびに CT 材の化学成分および熱処理後の機械的性質を表 2 に示す。図 1 に熱処理後の CN 材、CT 材の組織写真を示す。

同一素材に対する熱処理方法の違いが、ほぼ等しい表面仕上げ状態の試験片の疲労特性をどのように変化させるかを明らかにするために CN 材と CT 材を準備した。

図 2 に試験片の形状、寸法を示す。試験片は、疲労

* 昭和 59 年 11 月 29 日 第 929 回講演会において講演、原稿受付 昭和 59 年 4 月 20 日。

** 正員、九州大学工学部(〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*** 正員、久留米工業高等専門学校(〒830 久留米市小森野町 1232)。

被害を受ける領域を限定して、すべり帯や疲労き裂の発生および伝ばのレプリカ法による連続観察を容易にするため、中央部に浅い部分切欠きが設けてある。この試験片の切欠き係数は小さく実質的に平滑材とみなし得る。疲労過程に及ぼす表面仕上げ(表面粗さおよび研摩方向)の影響を調査するために、600 番および 120 番のシリコンカーバイトペーパーを用いて切欠き部の表面粗さを 2 とおりに変えた。また、切欠き部の研摩方向は試験片の軸方向および周方向とした。浅い部分切欠きは、まず機械加工し、その後ペーパー研摩加工で仕上げた。切欠き深さ 0.1 mm は、ペーパーによる研摩量(約 20 $\mu\text{m}^{(2)}$)も含めた最終的な深さである。浅い切欠き部以外の試験片表面は、最終的に 600 番シリコンカーバイトペーパーで軸方向に研摩してある。ペーパー研摩加工を終えた平滑試験片(図 2)の表面層をさらに約 4 μm 電解研摩により取り除いた後疲労試験に供した。この電解研摩量約 4 μm は、ペーパー研摩加工による表面の幾何学的特徴を残し、しかもすべり帯の発生状況の観察を容易にするように選んだものである。

電解研摩液はりん酸 1500 cc, ゼラチン 30 g, しゅう酸 30 g を混合したものである。

図 3 に CT 材を例にとって、ペーパー研摩・電解研摩後の表面仕上げ状態(真上から見たもの)を示す。600 番および 120 番のペーパー研摩・電解研摩による場合 A とペーパー研摩のみの場合 B⁽²⁾における各材料の表面粗

さは表 3 に示すとおりである。600 番, 120 番のペーパー研摩・電解研摩による表面仕上げ状態を仕上げ記号で表せば、各材料ともそれぞれ $\nabla\nabla\nabla$ および $\nabla\nabla$ に相当している。

図 1 組織写真

図 2 平滑試験片(浅い部分切欠き付き)

表 1 試験片材料 CN 材, CT 材に対して行った熱処理

Material	Heat treatment
S45C (CN)	Normalizing 845°C/30min, air cooled
S45C (CT)	Normalizing 845°C/30min, air cooled Quenching 845°C/30min, water quenched Tempering 490°C/60min, water cooled

表 2 化学成分および機械的性質⁽³⁾

Material		Chemical composition, %								Mechanical properties, MPa, %				
		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	$\sigma_{0.2}$	σ_B	σ_T	ψ	HV
S45C	CN	0.45	0.25	0.79	0.010	0.010	0.09	0.03	0.18	463*	761	1412	60	210
	CT									871	981	1691	58	308

*: 下降伏点。ψ: 絞り。HV は荷重 9.8 N とし、直径 5 mm の表面で測定。引張試験片の直径は 5 mm, 標点距離は 50 mm。

表 3 各仕上げ状態の疲労限度(A: 直径 5 mm, ペーパー研摩・電解研摩; B⁽²⁾: 直径 5 mm, ペーパー研摩)

Paper - Polishing	Surface roughness			Fatigue limit σ_{wb} MPa	Surface fatigue factor m			Remarks
	Rmax μm		Finish mark					
	CN A	CT A B		CN A	CT A B	CN A	CT A B	
#600-L	3	3 4		275	461 539	1.00	1.00 1.00	L:Longitudinal
#600-C	2	2 3		275	441 510	1.00	0.96 0.95	
#120-L	19	17 21		275	412 480	1.00	0.89 0.89	C:Circumferential
#120-C	17	14 19		245	373 451	0.89	0.81 0.84	

試験機は小野式小形回転曲げ疲労試験機(容量 15 N・m, 3 000 rpm)である。

疲労過程の連続観察およびき裂長さの測定は、所定の応力繰返し数ごとに試験機を停止させて採取したレ

プリカに金を蒸着させたものについて光学顕微鏡によって行った。

3. 実験結果および考察

ペーパー研磨面のような実際の加工面には規則正しい

図 3 S45C 焼入れ焼もどし材 (CT 材) の電解研磨後の表面仕上げ状態 (レプリカによる; L: 軸方向研磨材; C: 周方向研磨材; $\longleftrightarrow$ 軸方向)

図 4 S-N 曲線 (L: 軸方向研磨材; C: 周方向研磨材)

図 5 表面粗さ R_{max} と表面係数 $m = \sigma_{wb} / \sigma'_{wb}$ (σ_{wb} : 研磨材の疲労限度; σ'_{wb} : 600 番軸方向研磨材の疲労限度; L: 軸方向研磨材; C: 周方向研磨材; 斜線を施した部分が、近似的に研磨方向によるばらつきの範囲とみなされる)

図 7 S45C 焼入れ焼もどし材 (CT 材) において破断する応力を繰返す時の表面状態の変化 (L: 軸方向研摩材; C: 周方向研摩材; $\leftrightarrow$ 軸方向)

図 6 S45C 焼ならし材 (CN 材) において破断する応力を繰返す時の表面状態の変化 (L: 軸方向研摩材; C: 周方向研摩材; $\leftrightarrow$ 軸方向)

すじばかりではなく不規則なきずも存在し、それらの寸法は小さきまぎまである。表面が粗くなれば大きくて深いものが多くなる(図3)。表面のこのように複雑な形状は、材質によっては実際の機械部品の疲労挙動を大きく変動させる要因となり得る。

疲労挙動に及ぼす表面仕上げ状態の影響を評価する際に、これまでの研究では主として種々の表面状態に仕上げられた平滑試験片の破断、非破断を基準としている⁽⁴⁾。これに対し本論文では、最終破断の起点に注目しながら、その疲労過程をき裂発生過程とき裂伝ば過程に分けて考え、以下すべて二つの過程における表面状態の変化と表面仕上げ状態との対応を検討する。

本論文で取扱った主な項目は、以下のとおりである。

- (1) 種々の表面状態に仕上げられた表面を持つ試験片の $S-N$ 曲線(図4)
- (2) 表面係数(600番軸方向研磨材を基準とした

研磨方法の異なる他の研磨材の相対疲労限度)と表面粗さとの関係(表3, 図5)

(3) き裂発生過程並びにき裂伝ば過程での浅い部分切欠き表面のレプリカ連続観察(図6~11)

(4) 疲労き裂伝ば特性(図12, 13)

3・1 疲労限度と $S-N$ 曲線に及ぼす表面仕上げの影響 図4に種々の仕上げ状態の試験片の $S-N$ 曲線を示す。いずれの $S-N$ 曲線についても、繰返し数 $N=30 \times 10^4 \sim 300 \times 10^4$ の間においてめいりような折点が認められる。

表3は回転曲げ疲労試験における各試験片の疲労限度 σ_{wb} を比較したものである。

図5にCN材, CT材について、表面係数 m と表面粗さ R_{max} との関係を示す(表3のAとB)。

図5の軸方向研磨材、周方向研磨材の曲線はそれぞれ、応力の方向と研磨方向が相対的に種々変化した場合の、 $m-R_{max}$ 曲線の上限值と下限値を与えると考え

図8 S45C焼ならし材(CN材)において疲労限度の応力を繰返す時の表面状態の変化(L:軸方向研磨材; C:周方向研磨材; →軸方向)

図9 S45C焼入れ焼もどし材(CT材)において疲労限度の応力を繰返す時の表面状態の変化(L:軸方向研磨材; C:周方向研磨材; →軸方向)

てよい。

図 4, 表 3, 図 5 からわかることは,

(1) 軟らかい CN 材 ($HV=210$) と硬い CT 材 ($HV=308$) とでは化学成分および素材は等しいが, 熱処理による硬さの増加のため CT 材で表面仕上げの影響が大きくなっている。すなわち, 表面粗さの増加に伴う相対疲労限度(表面係数)の低下は硬い CT 材で大きい[図 5 (b) と (c) に同様な傾向が見られる]。このことは表面仕上げ状態がほぼ等しい CN 材と CT 材とでき裂発生箇所の特徴が異なること [図 6 (b), (c); 図 7 (b), (c)] から理解できる。硬い CT 材では, 微小なきずでも切欠きの役割をもち, それが破断の起点になりやすい⁽²⁾(図 7, 9)。これからもわかるように, 硬い材料で表面仕上げの影響が大きいのは, 主として硬い材料程切欠きに敏感となるためである。

(2) CN 材の 600 番軸方向と周方向研磨材の疲労

限度は一致している。これは, 切欠き深さがある限度以下になる時, 切欠きが存在しても疲労限度が低下しない現象⁽⁵⁾と対応している。

(3) CN 材の 600 番と 120 番軸方向研磨材の有限寿命は後者のほうが長い。これは主としてき裂発生および初期き裂伝ば過程の相違に基づくものと思われる。すなわち, 図 12 からわかるように, 同一応力のもとでのき裂伝ば寿命(表面でのき裂長さ $l \approx 0.1$ mm 以上の範囲)は両者でほぼ等しいが, 両者においてき裂発生はきずは無関係 [図 6 (a), (b), (c) 参照] であることと 120 番のほうが加工硬化が多少大きいと思われることを考慮すれば, 120 番のほうが微小な一定長さのき裂を生ずるに要する寿命はいくらか長いはずである。

疲労限度は 600 番と 120 番軸方向研磨材とで等しいが, その理由は図 8 (a), (b), (c) の比較から推定

図 10 S45C 焼ならし材(CN 材)において疲労限度の応力を 10^7 回繰返した後のすべり帯の発生状態の比較 (L: 軸方向研磨材; C: 周方向研磨材; → 軸方向)

図 11 S45C 焼入れ焼もどし材(CT 材)において疲労限度の応力を 10^7 回繰返した後のすべり帯の発生状態の比較 (L: 軸方向研磨材; C: 周方向研磨材; → 軸方向)

図 12 S45C 焼ならし材(CN 材)における各表面仕上げ状態のき裂伝ば曲線(疲労限度に対する相対応力が同じ場合の比較, $\sigma/\sigma_{wb} \approx 1.1$; L: 軸方向研磨材; C: 周方向研磨材)

図 13 S45C 焼入れ焼もどし材(CT 材)における各表面仕上げ状態のき裂伝ば曲線(疲労限度に対する相対応力がほぼ同じ場合の比較, $\sigma/\sigma_{wb} \approx 1.10$; L: 軸方向研磨材; C: 周方向研磨材)

できる。すなわち、疲労限度の応力(三者で等しく 275 MPa)のもとですべり帯の発生状態がほぼ等しく、かつ微視的停留き裂は研磨のきずと無関係に発生している。

3・2 疲労過程に及ぼす表面仕上げ状態の影響

CN 材と CT 材の各表面仕上げ状態ごとに、図 6, 7 は破断する応力 $\sigma \approx 1.1\sigma_{wb}$ を繰返す時の表面状態の変化、図 8, 9 は疲労限度の応力を繰返す時、最も被害が

大きいと思われる場所の表面状態の変化、図 10, 11 は疲労限度の応力を 10^7 回繰返した後の平均的な場所におけるすべり帯の発生状態、図 12, 13 はき裂伝ば過程におけるき裂長さ l (試験片の円周に沿った長さ) と繰返し数 N との関係(縦軸は $\ln l$, 横軸は N)である。

これらの図からわかることは、

(1) 二つの材料の各表面仕上げ状態について、ペーパー研磨のみの研磨材⁽¹⁾⁽²⁾や通常の炭素鋼⁽⁶⁾⁽⁷⁾と同様に、疲労限度は微視的停留き裂の伝ば限界で決まっている。微視的停留き裂の発生しやすい箇所は、滑らかな表面ではきずとは無関係であり〔図 8 (a), (b), 図 9 (a)〕, 硬い材料あるいは粗い表面では不規則なきずの周辺や深いすじの底などである〔図 8 (d), 図 9 (b), (c), (d)〕。

(2) CN 材では停留き裂が生じるまでに微視的き裂伝ば過程が認められるが、CT 材では 120 番軸方向研磨材を除いてほとんど伝ばせずに停留している。

これらの微視的停留き裂の長さは CN 材のほうが CT 材よりも少し長いようである。

(3) き裂長さが約 0.1 mm 以上になれば、き裂伝ば曲線はほぼ直線となっている。このことは、この範囲($l > 0.1$ mm)でき裂伝ば速度 dl/dN はき裂長さ l にほぼ比例することを意味する(図 12, 13)。

(4) CN 材において、同一応力を繰返す時、 $l > 0.1$ mm の範囲でき裂伝ば曲線が平行となることから、 $l > 0.1$ mm の範囲ではき裂伝ば過程に対して表面仕上げ状態はほとんど影響しないといえる。 l が 0.1

mm 以下でき裂伝ば曲線が折れ曲がるのは、加工硬化層の存在によると思われる。また、CT 材においても $l > 0.1$ mm でき裂伝ば特性は表面の仕上げ状態にはほぼ無関係である。

(5) 図 12 と 13 の比較からわかるように、表面仕上げ状態がほぼ等しい場合、同一相対応力 ($\sigma/\sigma_{wb} \approx 1.1$) のもとでは CT 材のほうが CN 材よりき裂伝ば速度は速い。

4. 結 論

S 45 C 焼ならし材 (CN 材)、S 45 C 焼入れ焼もどし材 (CT 材) の回転曲げ疲労過程に及ぼす表面仕上げ状態 (表面粗さおよび研摩方向) の影響に関する実験から次の結論を得た。

(1) 上記 CN 材および CT 材の各表面仕上げ状態に対する疲労限度 σ_{wb} の物理的意味は同じであって、 σ_{wb} はこの応力の繰返しによって生じた微視的き裂の伝ば限界応力である。ただ、その起点が表面仕上げ状態によって異なるだけである。

(2) 表面仕上げ状態の違いによって、すべり帯の発生密度の分布が異なる。すなわち、滑らかな表面 ($R_{\max} \leq 2 \mu\text{m}$) では一様な分布となるが、粗い表面 ($R_{\max} \approx 20 \mu\text{m}$) ではすじやきずの底付近にすべり帯は

集中的に発生する。

(3) 各表面仕上げ状態について、二つの材料にそれぞれの状態の疲労限度に対して同じ相対応力を繰返す際のき裂伝ば速度は CN 材より CT 材のほうが速い。

(4) き裂伝ば過程 ($l \geq 0.1$ mm) には表面仕上げの影響はほとんどない。

(5) ペーパー研摩のみの研摩材とペーパー研摩・電解研摩材の疲労挙動並びにそれを支配する背景は共通している。したがって、本実験の結果は実際の仕上げ面を持つ機械部品の疲労挙動の分析にも応用できる。

本研究を行うにあたり、実験に協力していただいた九州大学内堀久幸氏、久留米工業高等専門学校 奥園兼郷氏および森 美彦氏に対し深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) 西谷・今井, 機論, 49-442, A (昭 58), 693.
- (2) 西谷・今井, 機講論, No. 838-2 (昭 58-5), 30.
- (3) 西谷・ほか 2 名, 機講論, No. 828-1 (昭 57-3), 1.
- (4) 例えば, 日本機械学会編, 金属材料疲れ強さの設計資料 II・表面効果, (昭 52), 4, 日本機械学会.
- (5) 西谷・遠藤, 機講論, No. 820-12 (昭 57-10), 182.
- (6) 西谷・千代, 機論, 40-329 (昭 49), 41.
- (7) 西谷・高尾, 機論, 40-340 (昭 49), 3254.

討 論

〔質問〕 西 島 敏

〔科学技術庁金属材料技術研究所〕

(1) CN 材の場合、# 120・C は明らかに弱く、120・L は有限寿命範囲では 600・L よりもむしろ強いようにみえる点は、どう説明されるか。

(2) 図 5 や表 3 の整理と関連してコメントしたい。図 4 の S-N 曲線で、傾斜部はデータのばらつきのほぼ中央を通る平均的傾向を表す線を描いている。疲労限度についても当然平均的な値を採用すべきであるが、これまでの慣例ではばらつきの下限値をとっている。当学会基準^(付 1)でもわずか 4 個の試験片で疲労限度の平均値を求める方法が示されていることを指摘したい。

〔回答〕 (1) # 600・L と # 120・L においてき裂発生はきずくに無関係〔図 6 (a), (c) 参照〕であることと # 120・L のほうが加工硬化が多少大きいこと〔表面の硬さは # 600・L で HV (25 g) 244, # 120・L で HV (25 g) 302〕によると思われる。

(2) 貴重なご意見感謝する。ご指摘の「日本機械

学会基準」を検討して今後参考にしたいと思う。

〔質問〕 加 藤 容 三〔岐阜大学工学部〕

図 4 において、S-N 曲線の鋭い屈曲点は、微視的き裂の停留時期と一致するのか。もし、一致するとすれば、屈曲点の繰返し数が仕上げの程度によって、異なるのはなぜか。CN 材の時、特に、屈曲点の繰返し数の違いが大きいが、この原因について、お考えがあればご教示願いたい。

〔回答〕 本実験の範囲では、ご指摘のことに關して観察が困難なので、明確な結論は得ていない。

なお、折点の位置が仕上げによって異なる理由は、よくわからない。

〔質問〕 三 沢 啓 志〔東京都立大学工学部〕

(1) 771 ページ右欄 15 行めからの部分で、図 8 を見ると (a), (b), (c) と (d) も含めてほぼ同じような現象とも見えるが、# 120・C の疲労限度のみ低くなる理由はなにか。

(2) 772 ページ右欄 16 行めの (2) について、図 9 の写真でみると、文中の記述とは逆に # 120・L 以外

は伝ばしたのち停留しているように見えるがどうか。

(3) 表3に示すあらさは、研摩方向とどのような関係になっているのか。

(4) 771 ページ右欄7行め以下で、図12上で比較すると、#120・L のほうが $l \geq 0.1$ でき裂伝ば寿命は #600 の約1.4倍になっている。寿命で比較した時の“差あり”の判定基準をお教え願いたい。

(5) 結論(4)は、#120・C の結果を無視しているのではないか。

〔回答〕 (1) #120・C、#600・C ともに表面にはペーパー研摩によって作られた円周切欠きがある。それにもかかわらず、疲労限度が、#600・C で低下せず#120・C で低下する理由は、円周切欠きの深さがある限

度以下になれば、その切欠材の疲労限度が低下しないことによると思われる。

(2) 写真が小さすぎたため不明確ではあるが、図9の原図では文中の記述のとおり現象が見られる。

(3) 表面あらさ $R_{\max}$ は研摩方向と直交する方向に関して測定した値である。

(4) ここでは全寿命の差(約2倍)がき裂発生過程とき裂伝ば過程のどちらによって主に支配されているかを議論している。その意味で本文中のような表現をした。

(5) 結論(4)は同一応力レベルの下での議論である。

(付1) 日本機械学会基準「統計的疲労試験方法」, JSME S 002(1981).