

【論文】

高強度鋼の超長疲労寿命挙動

中橋 克彰*1 吉房 篤*1 石橋 整*2
田中 一彦*2 田中 哲志*3

Very Long Fatigue Life Behavior of High Strength Steel

Katsuaki NAKAHASHI Atsushi YOSHIFUSA Hitoshi ISHIBASHI
Kazuhiko TANAKA Satoshi TANAKA

Abstract- In order to investigate the very long fatigue life characteristics, the rotating bending fatigue tests were carried out on the high strength steel.

Keyword: Fatigue, High strength steel(SNCM439,SUJ2), Very long fatigue life, Fish-eye, Electro polishing, coxing experiment, Fracture surface, SEM

1. 緒言

近年、各種機械・構造物の余寿命評価や信頼性確保に対する社会的要請が一段と高まるとともに、経済的理由からこれらの実製品に対する寿命延伸技術の確立が強く望まれている。これは設計時の耐用年数を超えて機械・構造物を長期間使用することにつながるもので、部材の長寿命域における疲労特性が重要な課題となる。一方、金属材料の疲労特性については多くの鉄鋼材料に関し $N=10^6 \sim 10^7$ 付近の応力繰返し数で S-N 曲線が水平に折れ曲がり、明瞭な疲労限度が現れる一般的傾向がある。しかし、高強度鋼や表面処理材等に関し S-N 曲線が $N=10^5 \sim 10^6$ 付近で一旦水平に折れ曲がって見掛けの疲労限度が現れた後、 $N=10^7$ 前後から、内部の介在物が起因して、S-N 曲線が再び低下する二段折れ曲がり現象がしばしば報告されている^{(1)~(16)}。

しかしながら、超長疲労寿命挙動に関しては、まだ不明な点が多く残されている。特に、前述の二段折れ曲がりに及ぼす種々の因子に関しては、今なお

未解明な部分が多くある。

そこで本報では、まず SUJ2 材を用いて、強度に及ぼす表面仕上げの影響などについて検討するとともに、SNCM439 電解研磨材を用いてコーキシング実験を行い、フィッシュアイの発生する応力とその繰返し数について調べた。

2. 供試材および実験方法

本研究で用いた供試材は SUJ2 及び SNCM439 であり、それらの化学成分及び機械的性質をそれぞれ Table 1 及び 2 に示す。

熱処理条件は、SUJ2 材は 835°C・40min 加熱・油冷→180°C・120min 加熱・空冷、SNCM439 材は 860°C・30min 加熱・空冷→850°C・60min 加熱・油冷→160°C・120min・加熱・空冷である。試験片の試験部表面は、SUJ2 の場合、#100 の砥石による研削加工を施したままのもの(G 材)と、その後電解研磨で表面層を約 25 μm 以上研磨したもの(EP 材)を用いた。SNCM439 では、機械加工後、エメリー紙で研磨した後、加工影響層を取り除くために電解研磨で表面層を約 25 μm 以上除去した。Fig.1 に試験片の形状寸法を示す。

*1 大学院工学研究科機械工学専攻

*2 機械工学科 4 年

*3 機械工学科

Table 1 Chemical composition

Material	(wt%)								
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SUJ2	1.01	0.23	0.36	0.01	0.01	0.06	0.04	1.45	0.02
SNM439	0.4	0.22	0.78	0.02	0.013	0.18	1.78	0.83	0.2

Table 2 Mechanical properties

Material	HV	σ_B (MPa)	ϕ (%)
SUJ2	740	2300	0.4
SNM439	610	2107	37

疲労試験機には、SUJ2 の場合、4 連式片持ち回転曲げ疲労試験機(繰返し速度は 3150rpm)を使用した(日本材料学会・疲労部門委員会・組織構造分科会にて開発されたものである)。SNM439 の場合、小野式回転曲げ試験機(容量 98N・cm,繰返し速度約 2500rpm)を使用した。

疲労試験は、室温(20±2°C)・大気中で行った。Fig.1(a)SUJ2 材の $K_t=1.06$ であるが、応力はいずれも最小断面における公称曲げ応力とした。破面観察には SEM(走査型電子顕微鏡)を用いた。

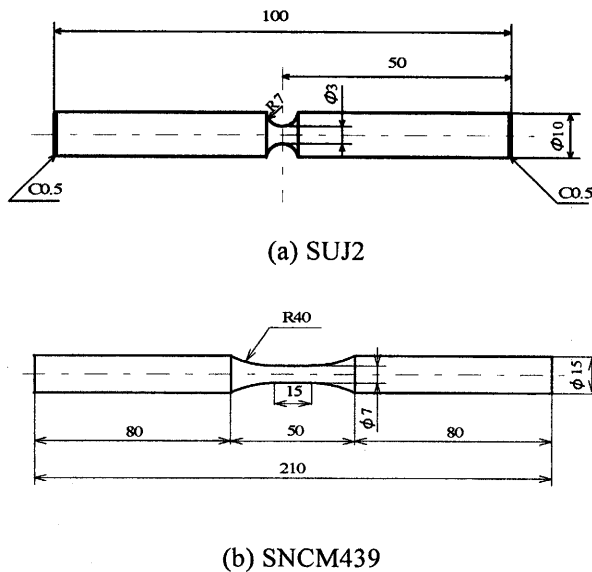


Fig.1 Shape and dimensions of test piece

3. 実験結果および考察

3.1 SUJ2 材の S-N 曲線と SEM 破面

Fig.2 およびFig.3にそれぞれS-N曲線とSEM破面を示す。図中の□, ■はG材で、○, ●はEP材を示す。□, ○は各々

高応力で表面を起点として破断したもので(Fig.3(a))、■, ●は各々低応力で内部の介在物を起点として破断したものである(Fig.3(b))。

これらの結果によると、 10^7 回付近までは、S-N 曲線は加工層を持つG材が若干上方に位置する。そして、両材とも $N=10^7$ 回における見掛けの疲労限度(σ_{w01})以下の応力においては内部の介在物を起点とするフィッシュアイ^{(10), (14)~(16)}が現れた後、破断が起こる。ここで、Fig.3(b)に注目すると、EP 材のフィッシュアイは表面まで達しているが、G 材のフィッシュアイは明確に表面まで達した様子うかがえないのと同時に表面からの破面と連続しているようにも見える。このことは表面の粗さと加工層が影響しているものと思われる。G材のS-N 曲線は、表面起点型の破断と内部起点型の破断のS-N 曲線が交わった状態と考えることができる^{(12), (13)}(見掛けの疲労限度はG材で $\sigma \approx 1300$ MPa、EP材で $\sigma \approx 1200$ MPa前後となる)。内部起点型の疲労限度(σ_{w02})は、 2×10^8 回の時間強度で判断すると両材ともほぼ同程度となる。

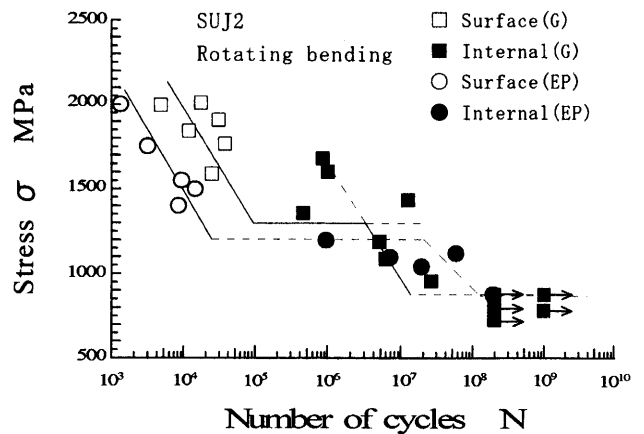
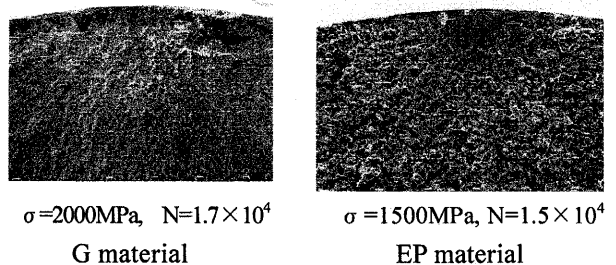


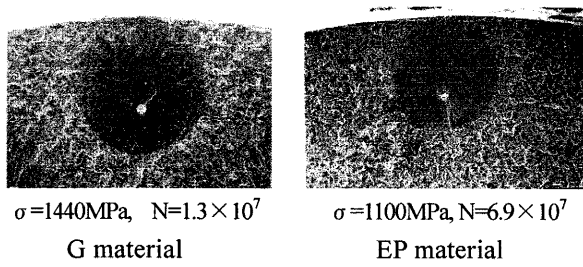
Fig.2 S-N curve



(a) Origin of surface

Fig.3 Photographs of fracture surface

150 μ m



(b) Origin of internal

Fig.3 Photographs of fracture surface 150 μm

3.2 SNCM439 EP 材の S-N 曲線

Fig.4 は、SNCM439 EP 材の S-N 曲線を示す。図中の○は表面の介在物を起点として破断したもので、●は内部の介在物を起点として破断したものである。この結果によると、典型的な二段折れ曲がりの S-N 曲線を示している。また、低繰り返し数で破断した場合の起点は主に表面の介在物であり、高繰り返し数で破断した場合の起点は内部の介在物である。詳細については前に報告した通りである⁽¹⁰⁾。

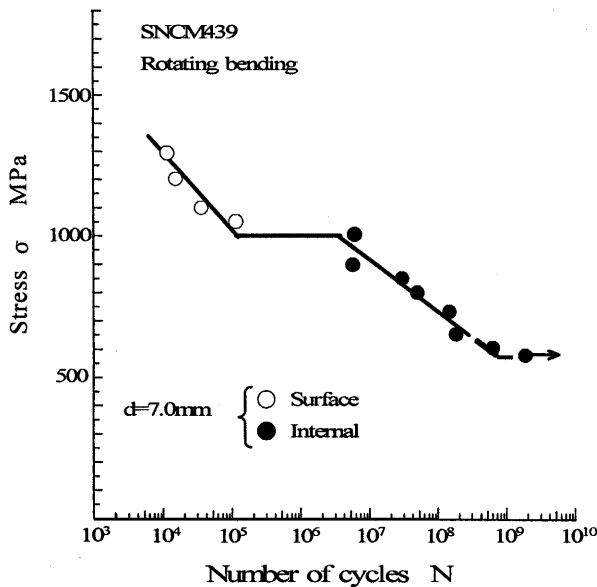


Fig.4 S-N curve

3.3 電解研磨した SNCM439 材におけるコーキシング実験と SEM 破面

一般には G 材で研究実験が行われているため、内部破壊を示す低い応力範囲(σ_1)で繰り返したものを、

表面破壊を示す高い応力(σ_2)に一気に応力を上昇して繰り返しても表面破壊しか見られない。さらにフィッシュアイが、どのくらいの応力で、どのくらいの繰り返し数で発生するのか、また、二段折れ曲がり後の疲労限度(σ_{w02})や、はたして σ_{w02} においてフィッシュアイの停留が認められるのかなどほとんど解明されていない。また、上記 σ_1 からコーキシング実験を行って、最終破断応力を σ_2 としてもすべての破面は表面起点型の破面となることがいわれている。以上の結果は、前述したように全て研削材の場合である(引張圧縮ではあるが、塩澤らによると $\Delta K_{GBF}=4 \sim 6 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ になると、 10^6 以降の繰り返し数で GBF からフィッシュアイが発生するとの報告もある⁽¹⁷⁾。

そこで本報では、特に表面仕上げに注目して、研削材の表面を電解研磨することにより、表面の凹凸を全くなくすとともに、加工影響層を除去した EP 材を用いて、コーキシング実験を行いフィッシュアイの発生する応力や発生する繰り返し数を検討した。

Fig.5 に SNCM439 による電解研磨材のコーキシング実験の結果を示す。また、そのときの SEM 破面の状態を Fig.6 に示す。

Fig.5 中の○、●はコーキシング実験における最終破断を、又同図中の小さな●最終応力レベル(σ_2)での破断繰り返し数を示し、図中の各数字は試験片番号を示す。

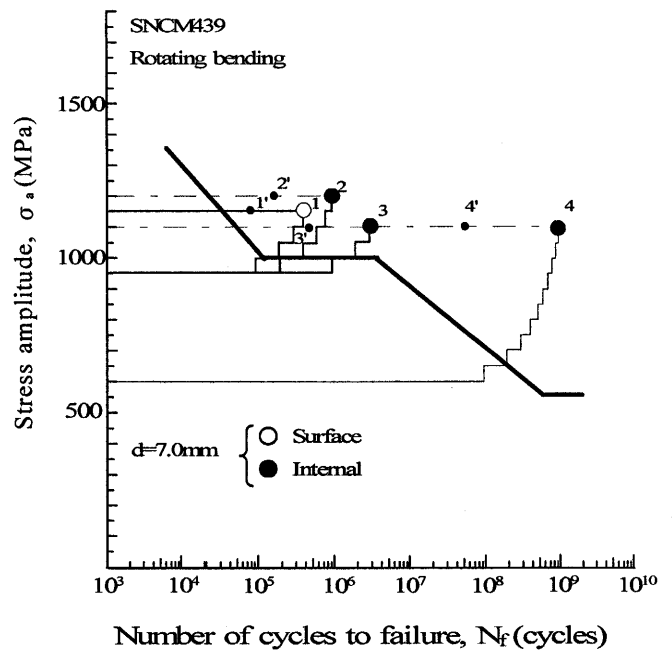
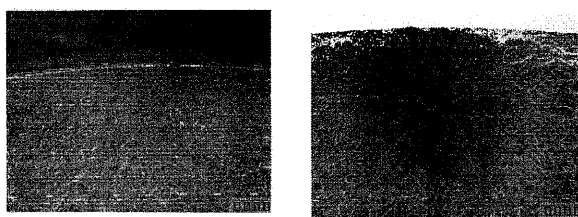


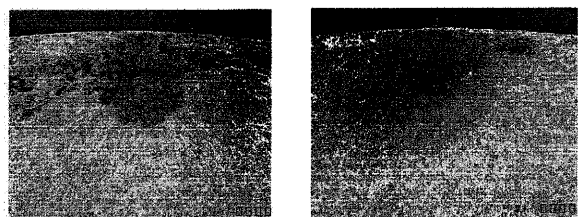
Fig.5 S-N curve

コーキシング実験条件は、一段目の応力(σ_1)を見掛けの疲労限度 σ_{w01} より幾分低い応力($\sigma_{w01}-50\text{MPa}$)と二段目の折れ曲がりの疲労限度(σ_{w02})より若干高い600MPaとした。 $\Delta\sigma$ は、50MPaである。 ΔN は、テストピース(T.P.)1,の場合は; 1×10^5 ,2,の場合は; 2×10^5 ,3,の場合は; 1×10^6 ,4,の場合は; 1×10^8 とした。ここで注目するのは、コーキシング実験による破面形態である(一般的な疲労限度の上昇等については議論をさける)。これらの結果によると、T.P.No.1の場合破面の起点は表面起点型であった(Fig.6.No.1,参照)。T.P.No.2~4の場合は内部の介在物を起点とするフィッシュアイタイプである(Fig.6のNo.2~4参照)。

以上のことから、まず、 σ_{w01} より幾分低い応力を σ_1 とした場合、フィッシュアイの発生は σ_{w01} の最初の折れ点よりわずかに大きい繰返し数で発生することがあきらかになった。又、 σ_{w02} より若干高い応力を繰返した場合も、二段目から一定応力の場合破断する応力となるが、その後、九段目で破断に至り、破面はフィッシュアイタイプであった。



T.P.No.1. Origin of surface T.P.No.2. Origin of internal



T.P.No.3. Origin of internal T.P.No.4. Origin of internal

Fig.6 Photographs of fracture surface 200 μm

4. 結 言

高強度鋼を用いて回転曲げ疲労試験を行い、超長疲労寿命挙動を調べた結果、本実験の範囲内において、得られた主な結果は以下の通りである。

(1) SUJ2材、SNCM439材ともS-N曲線は、二段折れ曲がり現象を示し、 $N=10^7$ 回における見掛けの疲労限度 σ_{w01} 以下の応力においては内部の介在物を

起点とする破断が現れる。

(2) SUJ2におけるG材とEP材の内部起点型の疲労限度 σ_{w02} はほぼ同じ値となる。

(3) SUJ2の低繰返し数域で起こった破断の起点は試験片表面における結晶のすべり、介在物または研削傷(G材)であり、高繰返し数域で起こった破断の起点は内部の介在物(フィッシュアイ型)である。

(4) SNCM439 EP材において、フィッシュアイは σ_{w01} の直下で発生し、その発生繰返し数は一段目の折れ点より若干大きい繰返し数である。

(5) 二段目の疲労限度 σ_{w02} より若干高い応力を一段目の応力 σ_1 とし、コーキシング効果の実験を行ったところ σ_2 での最終破面はフィッシュアイが存在した。したがって、 2×10^8 回の σ_{w02} の内部にはフィッシュアイの停留が認められることが示唆される。

参考文献

- (1) T.Naito・H.Ueda・M.kikuchi,Metal Trans,15A, p.1431(1984)
- (2) 浅見,熱処理,25,p.123(1985)
- (3) 浅見,杉山,熱処理,25,p.147(1985)
- (4) 増田・西島・田中,日本機械学会論文集,52A,p.847(1986)
- (5) 外山・菅田・宮原,熱処理,32,p.315(1992)
- (6) 浅見・弘永,材料,43,p.12(1994)
- (7) 金澤・西島,材料,46,p.1396(1997)
- (8) 松村・吉田・越智・政木,第26回疲労シンポジウム講演論文集,p.137(2002)
- (9) 菅田・城野・植松・大瀬戸・岡嶋,第26回疲労シンポジウム講演論文集,p.169(2002)
- (10) 緒方・藤崎・田中,九州産業大学工学部研究報告 第40号,p.48(2003)
- (11) 酒井,(J.Soc.Mat.Sci,Japan),Vol.53,No.5,p.586(2004)
- (12) 塩澤・魯・石原,第24回疲労シンポジウム講演論文集,p.35(1998)
- (13) 三角・池本・大久保,第25回疲労シンポジウム講演論文集,p.187(2000)
- (14) 村上敬宜・野本・植田・村上保夫・大堀,材料,48,p.1112(1999)
- (15) 塩澤・魯・石原,材料,48,p.1095(1999)
- (16) K.Tokaji・H.-N.Ko・M.Nakajima・H.Itoga,Mater.Sci.Eng.A,345,p.197(2003)
- (17) 塩澤・西野・長谷川・谷内,M&M 2005 材料力学カンファレンス講演論文集,No.05-9,p197