

SNM439 鋼の広寿命域における 回転曲げ疲労特性

Rotating Bending Fatigue Properties of SNM439 steel in
Wide Life Region

中橋 克彰^{*1} 藤崎 優^{*2}
田中 哲志^{*2}

Katsuaki NAKAHASHI Suguru FUJISAKI
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.

Keywords: Fatigue, High strength steel(SNMC439), Very long fatigue life, Fish-eye, Electro polishing, Coxing Experiment, Fracture surface, SEM, Wide life region

1. 緒言

近年、環境問題に対する関心の高まりと経済面などから、現在ある機器をその寿命まで安全に使用することが求められるようになってきており、以前にもまして疲労を考慮することが設計および保守管理において重要になっている。さらに、技術の進歩により様々な機器が高速化しているために、疲労が蓄積する繰返し数も非常に大きくなってきている⁽¹⁾。

高強度鋼や表面処理材では、S-N 曲線に特徴的な二段折れ曲り現象(見掛けの疲労限度 σ_{wI})が現れ、従来の疲労限度以下の応力においてフィッシュアイを伴う内部き裂の発生、進展によって破壊を生じる^{(2)~(7)}。この内部破壊の機構については不明な点が多く、内部き裂の発生時期や内部起点型破壊に対しては、直接観察することが不可能であるために研究は少ない^{(8)~(9)}。

ところで、内部起点型破壊において、内部き裂は非金属介在物周辺に粒状領域を形成後、フィッシュアイへと遷移し、本研究のような回転曲げ疲労試験機ではフィッシュアイが試験片表面に達した時点から、表面き裂として進展することが知られている⁽¹⁰⁾。また、

この破壊機構の初期段階に見られる非金属介在物をとりまく粒状領域は、低応力・長寿命域においては認められるが、高応力・短寿命域では現れないことが明らかになっている^{(10)~(11)}。

一般には研削材で研究が行われているため、内部破壊を示す応力範囲で繰り返したものを、表面破壊を示す領域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と云う報告は多い(したがって階段応力、いわゆるコーキシング実験がフィッシュアイ発見に有効であると考えられる)。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返し数で発生するか、また、超長寿命域での疲労限度(σ_{wII})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。

そこで本報では、特に表面仕上げに注目して、研削材(G材)の表面を電解研磨することにより、表面の凹凸をほとんどなくするとともに、加工影響層を除去した電解研磨材(E.P材)を用いて、小野式回転曲げ疲労試験機によってコーキシング実験を行い、主に σ_{wI} の直下の応力において、フィッシュアイの発生する繰返し数(N)を調べるとともに、破面観察も行った。

*1 大学院工学研究科機械工学専攻

*2 機械工学科

2. 供試材および実験方法

供試材は SNCM439 (ニッケルクロムモリブデン鋼) であり、化学成分及び機械的性質をそれぞれ Table1 及び Table2 に示す。

SNCM439 の熱処理は、860°C・30min 加熱・空冷→850°C・60min 加熱・油冷(40~60°C)→160°C・120min・空冷である。試験片は、最小直径 d=7mm に仕上げられたものを試験片として使用した。Fig. 1 に形状寸法を示す。

SNCM439 を用いた疲労試験には、小野式回転曲げ疲労試験機を使用した。試験は室温(20±2°C)、大気中で行った。応力はいずれも最小断面における公称曲げ応力とした。

Table 1 Chemical composition

(wt%)								
C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.40	0.22	0.78	0.02	0.013	0.18	1.78	0.83	0.20

Table 2 Mechanical properties

HV	$\sigma_{0.2}$	σ_B	ϕ
(50N)	MPa		%
610	1454	2107	37

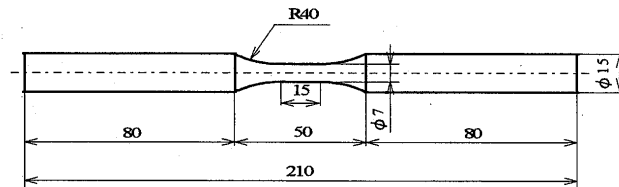


Fig.1 Shape and dimensions of test piece

3. 実験結果および考察

3.1 電解研磨した SNCM439 材におけるコーキシング実験

Fig. 2 は一定応力下における S-N 曲線を示す。

Table3 は、Fig. 3 中のテストピース (TP.) No. 1~8 までのコーキシングによる実験方法および結果を示す。

Fig. 3 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。図中の○、●はそれぞれ表面を起点として破断したもの及び内部の介在物を起点として破断したものである。Fig. 3 中の小さな●は、最終応力レベル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。

一般の炭素鋼で疲労限度の応力を繰り返した場合、折れ点付近の繰り返し数で表面き裂は停留し、その後 10⁷ 回まで繰り返しても、そのき裂は進展することはない。このことは、大気中でも真空中でも確認済みである⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

ここで超長寿命において内部起点型破壊するということは、試験片の内部は真空状態とほぼ同じ条件と考えて良い⁽¹⁴⁾。従って、始めに現われる折れ点付近の繰り返し数 N で、フィッシュアイが発生することが予想される。そこで、主な実験としては、上述の折れ点付近よりわずかに低い応力(σ_I)で、かつ折れ点の繰り返し数 N 付近からコーキシング実験を行うことは重要と考えられる。

Fig. 2 に示した S-N 曲線は、N=10⁷ 回における見掛けの疲労限度以下の応力においても内部の介在物を起点とする破断が現われる。よって、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⁽¹⁵⁾⁽¹⁶⁾。

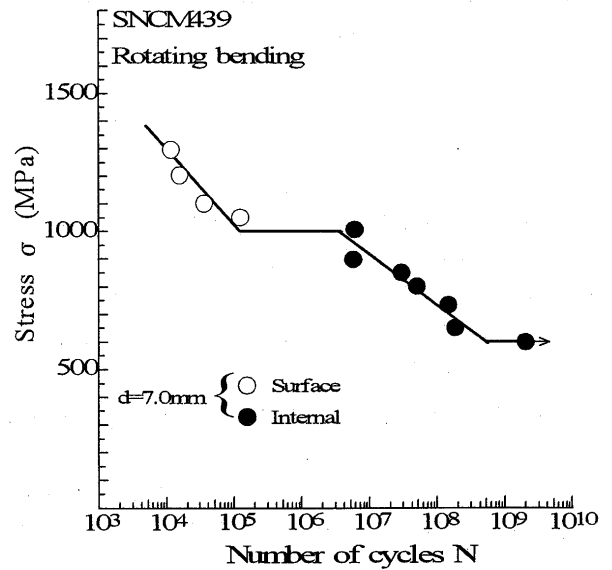


Fig. 2 S-N curve

コーキシング実験条件は、一段目の応力(σ_I)を見掛けの疲労限度(σ_{wI})より幾分低い応力($\sigma_{wI}-50$ MPa)と超長寿命における疲労限度(σ_{wII})より若干高い 600MPa とした。 $\Delta\sigma$ は、50MPa である。一段目の繰り返し数 N_I 及び ΔN は、TP. No. 3, の場合は ; 5×10⁴, TP. No. 4, の場合は ; 1×10⁵, TP. No. 5, の場合は ; 2×10⁵, TP. No. 6, の場合は ; 1×10⁶, TP. No. 7, の場合は ; 1×10⁷, TP. No. 8, の場合は ; 1×10⁸ 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、TP.No. 1 は $\sigma_1=800\text{MPa}$ で $N=1 \times 10^7$ 回まで一定応力で繰り返し、一気に 1200MPa まで応力を上げて繰り返しした。その結果は、表面起点型破壊であった。TP.No. 2 は $\sigma_1=950\text{MPa}$ で $N=2 \times 10^6$ まで一定応力で繰り返し、一気に 1200MPa まで応力を上げるとやはり表面起点型であった。TP.No. 3, 4 は見掛けの疲労限度域での始めの折れ点より低い繰り返し数で応力 950MPa からコーキシング実験を行った結果、両者ともに 1150MPa で破断し、表面起点型であった。次に TP.No. 5, 6 は応力 950MPa から実験を行った結果である。 N_f が TP.No. 3, 4 より若干大きい。TP.No. 5 は 1200MPa 、TP.No. 6 は 1100MPa と高い応力で内部起点型破壊を起こした。

Table3 Coaxing experiment

Material	Test piece	σ_1 (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)	N_f / ΔN	Surface	Internal
SNCM439	1	800	400	(1×10^7)	○	—
	2	950	250	(2×10^6)	○	—
	3	950	50	5×10^4	○	—
	4	950	50	1×10^5	○	—
	5	950	50	2×10^5	—	○
	6	950	50	1×10^6	—	○
	7	850	50	1×10^7	—	○
	8	600	50	1×10^8	—	○

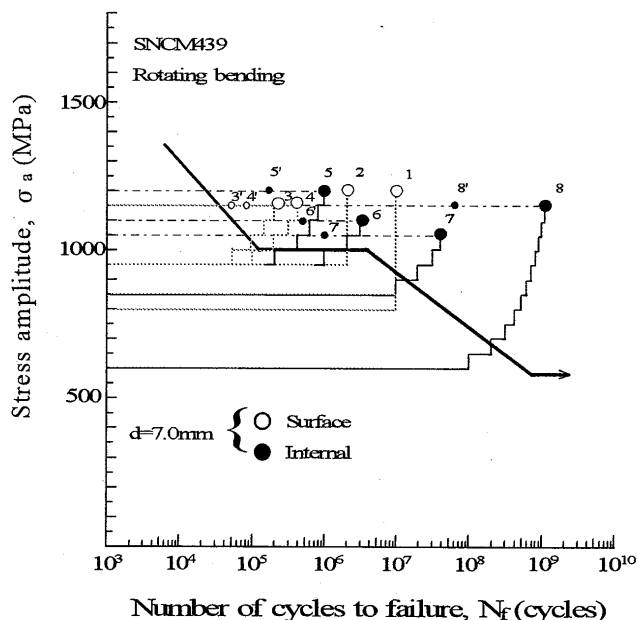


Fig. 3 S-N curve

以上のことから、まず σ_{w1} 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_{w1} の最初の折

れ点付近での繰り返し数で発生することが明らかになった。一方、 σ_{wII} より若干高い応力を繰り返ししたとき、三段目からの一定応力を繰り返しした場合は、確実に破断する応力であるにもかかわらず、その後、九段目で破断に至り、破断した破面はフィッシュアイタイプであった。

3.2 破面観察

Fig. 4(a), (b) は SNCM439 のコーキシング実験を行ったときの破面写真を示す。

Fig. 4(a) に Fig. 3 中の表面起点型破壊で破断した破面の一例を示す。

Fig. 4(b) に Fig. 3 中の内部起点型破壊で破断した破面の一例を示す。これを見ると表面より約 $0.15 \sim 0.45\text{mm}$ 内部に存在する $5 \sim 25 \mu\text{m}$ 程度の介在物が起点となり、フィッシュアイを形成した後、破壊が生じたことがわかる。

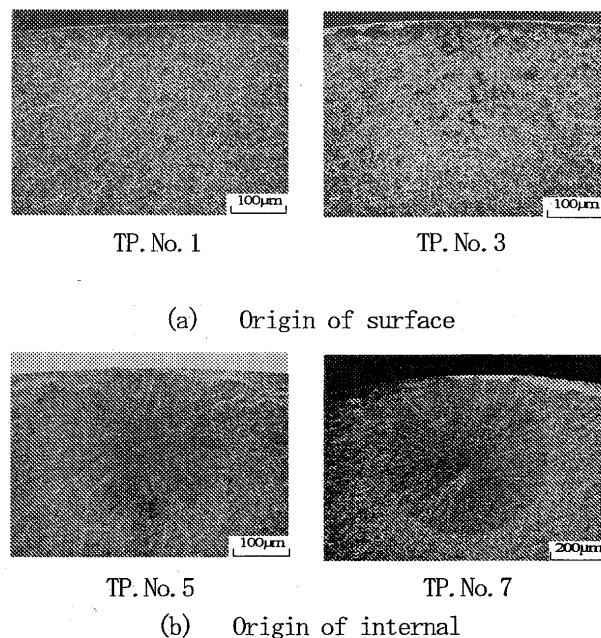


Fig. 4 Photographs of fracture surface

Fig. 5 は、フィッシュアイの各部位を拡大した写真である。これを見ると、各々の場所で破面の状態が違ってくる。Fig. 5 中の (a) に介在物を示し、(b) に介在物周辺の破面を示す。これらの写真から、本材料では介在物のすぐ近くの領域では粒状の少し粗い凹凸の状態になっている。しかし、SUJ2材などにおいて、このような面が観察されない場合もあり⁽⁷⁾、これらの現象が材料特性なのか否かは今後の課題である。(c) に介在物とフィッシュアイの輪郭との中間の破面を示す。この辺りでは、破面が平坦となっている。(d) にフィッシュアイの輪郭近傍の破面を示す。この写真から、フィッシュアイの内側でまやが凹凸が明瞭

な破面を示している。その外側のき裂は表面で凹凸の大きい粗い破面になっている。この様にフィッシュアイ内部は複雑な面を呈していることがわかる。

このフィッシュアイの形成メカニズムについては、何分実験中には直接観察出来ない試験片内部のことであるので、現在種々意見が分かれるところである^{(15)~(19)}がコーキング実験でフィッシュアイが発生したのは、どの部分の応力拡大が寄与したか、又 ODA⁽²⁰⁾などとの関係も明らかになっていない。

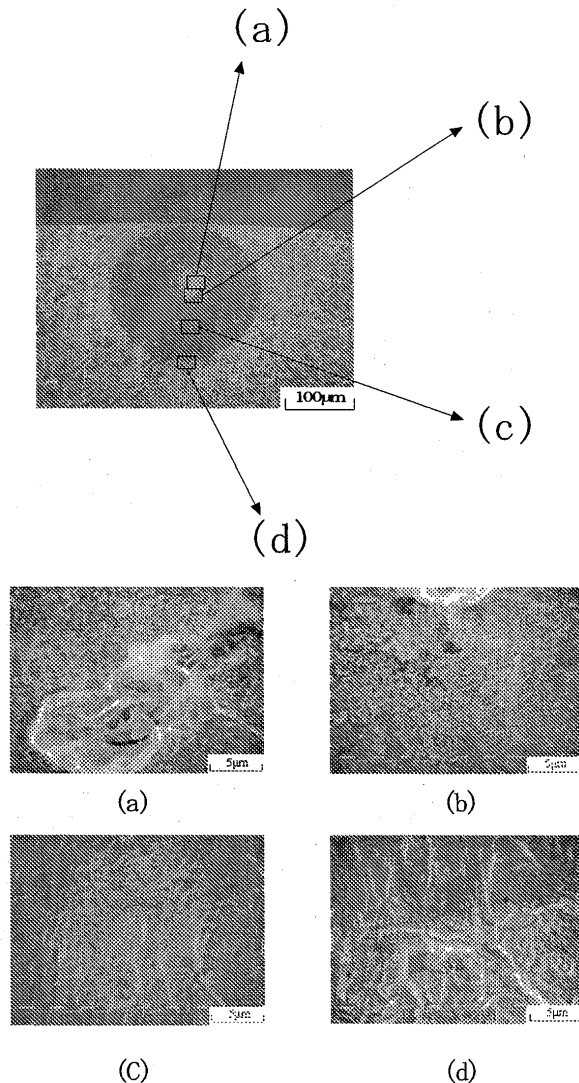


Fig. 5 Detail of fracture surface of point

4. 結言

実験としては、まだまだデータ不足であり、明確なことは、なかなか云えないが、以下のことは、今回の実験で得られた新しい事実である。まず、見掛けの疲労限度 σ_{w1} よりわずかに低い応力で繰り返した場合、フィッシュアイは早い繰り返し数で 1 回目の折れ点付近で発生することが明らかとなった。また、 σ_{w2} 付近の応力でコーキング実験を行ったところ、やはり

フィッシュアイの発生を確認できた。今後 σ_{w2} 付近の応力では、どのくらいの繰り返し数でフィッシュアイが発生するのか、さらに ODA の発生などが分かれば、高強度鋼を用いた設計を行うとき貴重なデータとなるものと考えられる。

参考文献

- (1) 三角正明・池本定信・大久保雅文, 第 25 回疲労シンポジウム講演論文集(2000), 187-190.
- (2) 内藤武志・植田秀夫・菊池雅男, 材料, 32-361(1983), 1162-1166
- (3) 江村秀樹・浅見克敏, 機論, 55-509, A(1989), 45-50.
- (4) 村上敬宜・野本哲志・植田徹・村上保夫・大堀学, 材料, 48-10(1999), 1112-1117.
- (5) 勝谷悟志・黒島義人・原田昭治, 材料, 48-10(1999), 1107-1111.
- (6) 塩澤和章・魯連涛・石原外美, 材料, 48-10(1999), 1095-1100.
- (7) 酒井達雄・武田光弘・塩澤和章・越智保雄・中島正貴・中村孝・子熊規泰, 材料, 49-7(2000), 779-785.
- (8) 黒島正貴・酒井達雄・清水真佐男・川寄一博, 機論, 60-580, A(1994) 2710-2715
- (9) 魯連涛・塩澤和章, 機論, 68-675, A(2002) 1666-1673.
- (10) 中島正貴・酒井達雄・清水利弘, 機論, 65-640, A(1999) 2504-2510.
- (11) 村上敬宜・植田徹・野本哲志・村上保夫, 機論, 66-642, A(2000) 311-319.
- (12) 松崎隆一・藤崎渉・田中哲志, 機構論, No. 0381, (2003), 9-10.
- (13) 松崎隆一・藤崎渉・田中哲志, 九州産業大学工学部研究報告・第 40 号, p61(2004).
- (14) 勝谷悟志・黒島義人・原田昭治, 第 24 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 41(1998)
- (15) Y. Murakami・M. Takada・T. Toriyama, Int. J. Fatigue, 16, p. 661(1998).
- (16) 村上敬宜・野本・植田・村上保夫・大堀, 材料, 48, p. 1112(1999).
- (17) 塩澤・魯・石原, 材料, 48, p. 1095(1999).
- (18) 中島・酒井・清水, 日本機械学会論文集 A-65, p. 2504(1999).
- (19) K. Tokaji・H. -N. Ko・M. Nakajima・H. Itoga, Mat er. Sci. Eng., A, 345, p. 197(2003)
- (20) 村上敬宜・植田徹・野本哲志・村上保夫, 第 24 回疲労シンポジウム講演論文集, p. 47(1998)