SNCM630鍛鋼材の疲労強度特性*

高橋 千 織** 小林 佑 規*** 千 田 哲 也**
風 間 明 仁**** 下 岸 隆 幸*****

Fatigue Strength of SNCM630 Forgings

By Chiori Takahashi, Yuki Kobayashi, Tetsuya Senda,
Akihito Kazama and Takayuki Shimogishi

Axial fatigue tests of SNCM630 forgings, which are often used for high-strength components in diesel engines, have been carried out with various stress ratios (R) for fatigue life $N \leq 10^7$ cycles. S-N curves obtained from the experimental results have shown fatigue limits of 500, 400, 300 and 190 MPa for $R = -1, 0, 0.3$ and 0.6 , respectively. The results suggest that the fatigue strength of SNCM630 is highly improved from a similar material, SNCM439. Study on the effect of stress ratio using a fatigue limit diagram with failure probability shows that modified Goodman diagram is applicable for the determination of fatigue strength of this material. However, under a stress condition of high R where the maximum applied stress may exceed the proportional limit, as for in the design it is recommended that the applied stress will not exceed the proportional limit. SEM observations of the fracture surfaces have revealed that fatigue cracks initiated from subsurface inclusions which are identified as alumina particles of $35 \mu\text{m}$ in diameter in only two specimens while crack initiated from surface flaws in other samples. Using the $\sqrt{\text{area}}$ parameter model for internal defects, the fatigue limit for $N > 10^9$ is estimated as approximately 410 MPa in case of $R = -1$.

1. はじめに

近年、船用中小型ディーゼル機関の小型化・軽量化に対するニーズの高まりから、クランク軸、連接棒など機関部材への高強度低合金鋼鍛造製品の利用が拡大している。連接棒材料の選定にあたっては、FEM 解析による強度評価、材料の焼入性、加工性やコストなどが考慮されるが、特に機関の高回転、高出力化を実現する場合、連接棒の重量増加は軸受け条件の悪化を招き、高回転化を阻む結果となるため、設計および材料選定の両面から軽量化を目指すことが必須となっている。このため、従来使用されているクロムモリブデン鋼 (SCM 材) から、より強度の高いニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM 材) へ、さらに SNCM 鋼の中でもより高強度の材質へと移行する傾向が顕著である。SNCM630 は SNCM 鋼の中でも特に高い強度を有している材料の一つであり、連接棒をはじめとする機関部

材に用いられている。しかしながら、鍛造材としての本材料には十分な疲労データが得られておらず、疲労設計を行う場合には類似材料のデータから推定されているのが現状である。高速機関では特に短時間で疲労限度を超える繰返し数に達するため、材料の疲労強度データを正確に把握することは製品寿命の信頼性向上の点から非常に重要であると考えられる。

本研究では、SNCM630 鋼の疲労試験を実施し、S-N 線図および疲労限度線図を求めた。特に高い平均応力が疲労強度に及ぼす効果を明らかにし、機関部材の疲労設計に必要な資料を提供することを目的としている。

2. 試験方法

2. 1 供試材 供試材は高強度低合金鋼 SNCM630 である。化学成分を表 1 に示す。インゴットから熱間圧延されて $\phi 250 \text{ mm}$ となった丸棒を鍛造し、 $574 \times 360 \times 36 \text{ t}$ の板材とした。寸法 360 mm の方向が鍛造方向であり、鍛錬成形比は 7.2S とした。これは実製品の連接棒キャップを想定したものである。成型後の熱処理条件は 900°C で 2 Hr 保持後、油焼入れを行

*原稿受付 平成 19 年 1 月 22 日。

**正会員 (独) 海上技術安全研究所 (三鷹市新川 6-38-1)。

*** (独) 海上技術安全研究所 (三鷹市新川 6-38-1)。

****正会員 新潟動機株式会社 (北蒲原郡聖籠町東港 5-2756-3)。

い、590℃で5 Hrの焼戻し処理を行った。調質後の硬さは、HB321であった。供試材の組織写真を図1に示す。

疲労試験に先立ち、JIS4号引張試験片を用いて標点間距離50 mmの定ひずみ速度 (2×10^{-4} 1/s) による引張試験を行った。表2に引張試験より得られた供試材の機械的特性値を示す。ここで、E：弾性係数、Se：比例限度、 $S_{0.2}$ ：0.2%耐力、Su：最大引張応力、 δu ：一様伸び、 S_f ：破断応力、 δ_f ：破断伸び、 Φ ：断面収縮率、 ν ：ポアソン比である。

表1 供試材の化学成分(mass%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.30	0.24	0.44	0.019	0.21	0.09	2.87	2.93	0.54

図1 供試材の組織

表2 供試材の機械的性質

E	Se	$S_{0.2}$	Su	S_f	δu	δ_f	Φ	ν
GPa	MPa				%			
203	720	904	1055	680	7.0	21.8	60.6	0.29

2.2 試験片 疲労試験片は、最小断面が直径12 mm、曲率半径72 mmの砂時計型とした。試験片の長手方向と鍛錬方向が平行になるように切り出して製作

図2 疲労試験片

した。疲労試験片の形状及び寸法を図2に示す。なお、疲労限度付近の試験ではチャック切れが生じたため、最小断面部直径を10 mm、曲率半径60 mmとした。いずれも応力集中係数Ktは1.04である。これら疲労試験片の表面はエメリー紙#1200で仕上げた。

2.3 実験方法 疲労試験には、荷重容量300 kNのデジタル制御の油圧サーボ疲労試験機（島津サーボパルサーUG300形、EG300形）を用いた。室温大気中の実験室環境で軸力負荷試験を行った。疲労試験の最小応力と最大応力の比である応力比Rは-1, 0, 0.3および0.6の4条件とした。これらの負荷条件は連接棒本体の幹部およびキャップR部にかかる応力状態を考慮したものである。また、疲労試験後の破面を目視と走査電子顕微鏡（SEM）を用いて観察した。起点部に非金属介在物が確認された場合にはEDX（Energy Dispersive X-ray analyzer）を用いて成分分析を行った。

3. 実験結果

3.1 疲労試験結果 応力振幅Saと破断繰返し数NにおけるS-N線図を、図3に示す。図中でR = -1の実験点は○が表面き裂起点、●が介在物起点のデータである。介在物起点の疲労破壊はR = -1の条件の2本のみで生じた。

S-N線図は、傾斜および定数をそれぞれkおよびCとし、次式により表すものとする。

$$S = k \log N + C \quad \dots (1)$$

Sa-N関係の傾斜は、図3において次のように定めた。まず、実験点の多いR = -1について寿命が安全側となるよう傾斜を定めた。次に、R = 0の傾斜は、R = -1に平行で、安全側の寿命となるように定めた。R = 0.3の傾斜は、R = -1およびR = 0と平行になるものとした。なお、R = 0.3の傾斜部の実験点は少なく、R = 0.6

図3 S-N線図

に傾斜部相当の実験点がないが、これは応力比が大きいときの最大応力が引張強さにほぼ近い値となるため、S-N 線図の傾斜部として成立する実験データを得ることは不可能だったためである。Sa だけでなく、応力範囲ΔS、最大応力 Smax と破断繰返し数 N における S-N 線図についてもその定数を求めたので表 3 にまとめて示す。疲労限度 S_f については、S-N 線図の水平部すなわち $N = 10^7$ までに破断しない応力レベルとした。R = -1, 0, 0.3 および 0.6 に対し、それぞれ、500, 400, 300, 190 MPa とした。

表3 S-N 線図の定数

R	k			C		
	Sa	ΔS	Smax	Sa	ΔS	Smax
-1	-132.4	-264.8	-132.4	1255	2509	1255
0	-132.4	-264.8	-264.8	1108	2216	2216
0.3	-132.4	-264.8	-378.3	1002	2004	2863
0.6	—	—	—	—	—	—

3. 2 破面観察結果 SEM による疲労破面の観察を行った結果、き裂はほとんどが試験片表面で発生していた。多くの場合、き裂発起点近傍は腐食生成物によって覆われており、観察しにくい状態のものも多かったが、問題となるような異物や大きな傷はほとんどなかった。通常みられる程度の表面傷がき裂発起点になったものとする。本実験範囲では例外は2点あり、図 3 中で●印で表した試験片では、疲労き裂発起点部に介在物が観察された。疲労試験後の破断面観察結果として、介在物起点の例を図 4 および図 5 に示す。図 3 で傾斜部に位置した試験片 ($S_a = 540 \text{ MPa}$, $N = 1.875 \times 10^5$) では起点は試験片表面であったが、図 4 に示すように、直径約 $30 \mu\text{m}$ の介在物が確認された。また、S-N 線図の水平部 ($S_a = 500 \text{ MPa}$, $N = 4.196 \times 10^6$) で破断した試験片の起点には、直径約 $35 \mu\text{m}$ の介在物が存在し、図 5 に示すように、内部き裂起点型破壊の特徴であるフィッシュアイが見られた。EDX 分析により、これらの介在物はいずれも Al_2O_3 であることが確認された。

4. 考察

4. 1 SNCM439 鋼との比較 高速機関用の連接棒には、一般に SCM435, SCM440, SNCM439 などが利用されている。SNCM630 は同系鋼種で広く構造用鋼として用いられている SNCM439 材に比べ、C と Mn を減らし、Ni と Cr 量を増やすことにより、高強度と

図4 表面非金属介在物起点の疲労破面
($R=-1$, $S_a = 540 \text{ MPa}$, $N = 1.875 \times 10^5$)
(a) 起点部近傍の破面, (b) 起点介在物の拡大

図5 内部非金属介在物起点の疲労破面
($R=-1$, $S_a = 500 \text{ MPa}$, $N = 4.196 \times 10^6$)
(a) 起点部近傍の破面, (b) 起点介在物の拡大

靱性および焼入性の改善を実現している。SNCM630 鋼を利用する場合、疲労データに関してはデータが豊富な SNCM439 材のデータを参考にして疲労設計に利用することも多い。鋼の疲労強度は、一般に引張強さや硬さと比例関係にあるが、その一方で、高強度になるにつれて引張強さに対する疲労限度の割合は低下することが知られている。

この観点から、本供試材と SNCM439 材¹⁾とを、図 6 において比較する。S-N 線図の応力振幅 S_a は引張強さ S_u で正規化した。SNCM439 材のデータについては熱処理条件の異なる複数のデータを用いており、破壊確率 50% の S-N 曲線を示している。これより S-N 線図の傾斜は、両鋼種ともそれぞれ $R = -1$ と $R = 0$ でほぼ平行であるものの、SNCM439 の方がやや大きくなっている。疲労限度については両者に大きな差があり、SNCM630 である本供試材が SNCM439 より大きい。すなわち、SNCM439 は、 $R = -1$ および $R = 0$ に対して $S_f/S_u = 0.385$ および 0.225 である。これに対し、本供試材は、 $R = -1$ および $R = 0$ に対して $S_f/S_u = 0.474$ および 0.379 である。この結果、SNCM630 の疲労強度は、SNCM439 より著しく改善されていることがわかる。

4. 2 疲労限度線図 ここでは、前項までの結果をもとに疲労限度線図を求めるとともに、その疲労設計時の留意点を検討する。図 3 の S-N 線図から決定した疲労限度を $N \geq 2 \times 10^6$ の値として表 4 に示す。また、 $N = 10^5$ の時間強度についても示す。

$N \geq 2 \times 10^6$ における疲労限度線図を図 7 に示す。縦軸は応力振幅 S_a 、横軸は平均応力 S_m である。図 7 には、修正 Goodman 線図、Gerber 線図を併記している。 $N \geq 2 \times 10^6$ における疲労限度線図は、 $R = 0$ 、 $R = 0.3$ 、 $R = 0.6$ の実験点がほぼ直線となる。そのため、 $R = -1$ ($R = -1$ は平均応力が 0 の条件であるので、図 7 の縦

軸が $R = -1$ を表している) と $R = 0$ を結ぶ直線と合わせると、 $R = 0$ で折れ曲がる直線が疲労限度線図の最も良い近似関係となる。引張強さ S_u とで示される $R = -1$ の疲労限度 (図中 A 点) を結ぶ修正 Goodman 線図は、本実験で得られた疲労限度線図より安全側に位置している。当然のことながら、0.2% 耐力と $R = -1$ の疲労限度を結ぶ Soderberg 線図は、修正 Goodman 線図よりさらに安全側の値となる。

ここで、本供試材の疲労限度線図は、高い平均応力の場合に、引張特性値の比例限度を超えている。疲労試験における試験片のひずみ挙動は、比例限度を超えると塑性ヒステリシスを生じるため、部材設計では負荷応力の最大値が、比例限度を超えないようにすべきである。この観点から疲労限度線図は、A (○)、B (▽)、Se (◇) の範囲内にある必要がある。

さらに、本供試材 SNCM630 の疲労限度について、SNCM439 の試験結果と併せ、引張強さで正規化した疲労限度線図を図 8 に示す。SNCM439 のデータには文献 1) の中で、応力比を変えて実験を行っているシリーズについて示している。記号▽、□、△のそれぞ

表4 疲労限度線図のプロット点(単位/MPa)

R	$N = 1 \times 10^5$		$N \geq 2 \times 10^6$	
	S_a	S_m	S_a	S_m
-1	592.7	0	500	0
0	446	446	400	400
0.3	340	631.4	300	557.1
0.6	—	—	190	760

図6 SNCM630とSNCM439のS-N線図の比較

図7 SNCM630の疲労限度線図

図8 正規化した疲労限度線図による SNCM630 と SNCM439 の比較

れのシリーズは、焼戻し温度が 625°C, 500°C, 280°C である。図8より、低温で焼戻し処理を行って、引張強さを高くした試験片 (Δ) は、平均応力の小さいところで、修正 Goodman 線図を下回る実験点が生じている。これに対し、SNCM630 では、データが Gerber 線図と修正 Goodman 線図の中間に位置し、ばらつきの小さい実験結果が得られている。

4.3 10^9 回における疲労限度の推定 本研究では 10^7 回までの疲労試験を行ったが、船用の高速ディーゼル機関では、連接棒などの部材は数日で 10^7 回の繰り返し数に達してしまう。よって、本供試材についても、より長寿命域での疲労限度を推定することは重要であると考えられる。近年注目されている超高サイクル疲労は、従来の 10^7 回までの試験で決定される疲労限度より低い応力であっても、 $10^8 \sim 10^9$ 回の範囲で材料内部からき裂が発生して起こる疲労破壊である。これは、主として材料内部の介在物や欠陥を起点とする。本供試材でも、前述のように 10^5 回オーダーで内部介在物起点の疲労破壊が起こっていることから、ここでは、超高サイクル域での内部介在物起点の疲労強度を検討する。

内部欠陥起点の超高サイクル疲労を評価する手法として、現在、最も検討されているのは、村上らの提案による疲労限度推定式²⁾である。この式については、高強度低合金鋼においても 10^9 回レベルの疲労限度推定に対して有効であることが、複数の研究者によって報告されている^{3)~5)}。よって、これにならい、 10^9 回レベルの疲労限度推定を試みる。

鋼中の介在物としては、様々なものが知られているが⁶⁾、本供試材では複数視野での組織観察と EDX 分析

図9 供試材中の各種介在物の二次電子像
(a)及び(b) 炭化物系及び硫化物系、
(c) 酸化物系介在物

の結果から、介在物として(Fe, Cr, Ni)を含む炭化物や MnS, Al_2O_3 、またはこれらに Fe や Ca, Cr, Mg などが含まれた複化合物が観察された。その例を図9に示す。図中の元素名は含有量の多い順に表記してある。介在物の中で最もサイズが大きく、多数みられたのは図9(b)のような炭化物系のもので、大きなものは 70 μm 程度であった。これに対し、図9(c)のような Al_2O_3 介在物は、ほとんどが 15 μm 以下で、介在物起点の破面で見られた粒子以外に、20 μm を超えるものは見つからなかった。鋼種によっては高硬度の炭化物系介在物などが、内部き裂起点となる場合のあることも報告されているが、ほとんどの場合は酸化物系介在物を起点としている^{4), 5), 7), 8)}。本研究の実験範囲では、

Al₂O₃ 介在物よりサイズが大きく出現頻度の比較的高い炭化物系介在物が起点となって破壊した試験片はなかった。また、小俣が行った SNCM630 鋼と同等の KSFA110 鍛鋼材 (NK 規格) についても 10⁹ 回の超高サイクル疲労域までの回転曲げ疲労試験⁵⁾ において、内部介在物起点で破壊したすべての試験片が Al₂O₃ 介在物を起点としていた。このことから、本供試材においても疲労の起点となる介在物は、Al₂O₃ 介在物であると考え、図 4 および 5 で観察されたものがその最大サイズとみなす。よって、介在物サイズを 35μm とし、前述の村上らの提案による疲労限度推定式を用いて推定を行った。

表面介在物起点に対して

$$\sigma_w = \frac{1.43(Hv + 120)}{(\sqrt{area})^{1/6}} \cdot \left(\frac{1-R}{2}\right)^\alpha \cdots (2)$$

内部介在物起点に対して

$$\sigma_w = \frac{1.56(Hv + 120)}{(\sqrt{area})^{1/6}} \cdot \left(\frac{1-R}{2}\right)^\alpha \cdots (3)$$

ここで、 $\alpha = 0.226 + Hv \times 10^{-4}$

σ_w : 疲労限度

Hv : ビッカース硬さ

$\sqrt{area}$: 介在物を最大主応力方向に投影したときの投影面積 $area$ の平方根 (μm)

計算の結果、供試材の 10⁹ 回での推定疲労限度は $R = -1, 0, 0.3, 0.6$ に対し、表面介在物起点の場合、それぞれ、370, 309, 282, 243 MPa、内部介在物起点の場合は、それぞれ、403, 336, 307, 265 MPa となった。

前述の小俣らによる KSFA110 鍛鋼材の回転曲げ疲労試験の結果によれば、実験に用いられた KSFA110 材 ($S_u = 1086$ MPa, $Hv = 356$) の 10⁷ 回以上での破断は、すべて内部介在物が起点となっていた。疲労強度は 10⁷ 回で 550 MPa 程度となっているのが、10⁸~10⁹ 回では 500 MPa 程度である。小俣らはさらに得られた疲労試験結果に対し、個々の介在物寸法に対応する疲労限度 σ_w を求め、その介在物位置での応力振幅 σ_a を除した値 σ_a / σ_w と寿命サイクル数 N_f の関係である修正 S-N 線図を作成している。これによれば、 $\sqrt{area}$ を用いた村上の式によって介在物寸法から疲労限度を近似的に推定することが可能であり、介在物起点型疲労破壊では 10⁷~10⁹ 回の範囲で σ_a / σ_w が 1.1~1.2 となることを示している。よって、これと同等に評価すれば、本供試材の 10⁹ 回における疲労限度は、材料表面に介在物が存在する場合を想定して、 $R = -1$ の場合、応力振幅が 410 MPa 程度と見積もられる。

5. まとめ

船用ディーゼルエンジンの連接棒等に用いられる SNCM630 鍛鋼材について軸力疲労試験を行い、S-N 線図から以下のことが明らかとなった。

- (1) 供試材の 10⁷ 回までの疲労限度は、応力比 $R = -1, 0, 0.3$ および 0.6 に対し、それぞれ、応力振幅が 500, 400, 300, 190 MPa であった。
- (2) SNCM630 の疲労強度は、同じ鋼種の SNCM439 より著しく改善されている。
- (3) 10⁷ 回までの疲労試験中、 $R = -1$ の条件で非金属介在物が起点となって疲労破壊が起こる場合があった。この介在物は 35μm 程度の Al₂O₃ であった。
- (4) 本供試材の疲労限度線図は、修正 Goodman 線図より安全側にある。しかし、大きな応力比では、最大応力が比例限度を超える値となるので、設計での最大応力は比例限度を超えない値とするのが望ましい。
- (5) 本供試材中に分散する介在物のサイズを考慮すると 10⁹ 回の疲労限度は、 $R = -1$ では 410 MPa 程度と推測される。

参考文献

- (1) (社)日本材料学会編、金属材料疲労信頼性設計資料集、(1998)。
- (2) 村上、金属疲労 微小欠陥と介在物の影響、(1993)、養賢堂。
- (3) 松村ほか 3 名、日本機械学会 2002 年度年次大会講演論文集、No.02-01, Vol.II, (2002-9)、361-362。
- (4) 古谷ほか 3 名、鉄と鋼、91-8(2005-8)、630-638。
- (5) 小俣、松下、平成 12 年度 ClassNK 研究発表講演集 (2000)。
- (6) (社)日本鉄鋼協会編、第 4 版鉄鋼便覧 CD-ROM 版、(2002)。
- (7) 長田、村上、材料、52-8(2003-8)、966-973。
- (8) 長田ほか 2 名、材料、54-12(2005-12)、1217-1224。