

超高サイクル域における SNCM439 鋼 低温焼戻し材の回転曲げ疲労特性

立命館大学 ○酒井達雄 立命館大学[院] 近藤 崇
 大同特殊鋼 速石正和 村瀬拓郎

Rotating Bending Fatigue Properties in Very High Cycle Regime for SNCM439 Steel Tempered at Low Temperatures

Tatsuo SAKAI, Takashi KONDO, Masakazu HAYAISHI and Takuro MURASE

1 緒 言

近年、高強度鋼例えば SUJ2 鋼の回転曲げ疲労特性について、 $S-N$ 曲線が一旦水平になった後、長寿命域でこの $S-N$ 曲線が再び低下する“2 段折れ曲がり現象”を示すことが報告されている。また、この $S-N$ 特性が表面起点型破壊と内部起点型破壊の $S-N$ 曲線が別々の場所に重なって現れる“二重 $S-N$ 特性”としてよく解釈されることが明らかにされつつある。このような現象は、耐久設計のような疲労限度を基にした設計の危険性を意味するため、鉄鋼材料の長期信頼性を保証するためには、ギガサイクル域にわたる疲労特性および内部起点型破壊の疲労メカニズムを解明する必要がある。

そこで、本研究では SNCM439 鋼について 2 つの異なる温度 (160℃, 180℃) による低温焼戻し材を準備し、ギガサイクル域にわたる回転曲げ疲労試験を実施して、上記の二重 $S-N$ 特性の有無を実験的に究明した。また、SEM による破面観察を行ない、フラクトグラフィの立場から考察を加えた。さらに、低温焼戻しにより高強度が保持されているため応力域により内部起点型破壊が現れたが、このような内部起点型破壊に対して、破壊力学的観点から考察を加えた。

2 供試材および実験方法

2.1 供試材 供試材は、2 種類の低温焼戻しを施すことにより高強度を保持したニッケルクロムモリブデン鋼 (SNCM439) である。焼戻し温度は、160℃および 180℃であり、両者を識別するために T-160 および T-180 と表記する。T-160 材および T-180 材に関して別の時期に製造さ

Table 1 Chemical composition of materials (mass%).

Material		C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
SNCM439	T-160	0.40	0.22	0.78	0.020	0.013	0.18	1.78	0.83	0.20
	T-180	0.41	0.24	0.66	0.018	0.016	0.13	1.71	0.75	0.21

Table 2 Heat treatment conditions.

Material	Normalizing	Quenching	Tempering
SNCM439	T-160 860℃×60min →Air cooled	850℃×60min →Oil cooled	160℃×120min →Air cooled
	T-180 860℃×60min →Air cooled	850℃×60min →Oil cooled	180℃×120min →Air cooled

Table 3 Mechanical properties.

Material		Tensile strength (MPa)	Vickers hardness HV
SNCM439	T-160	2274	639
	T-180	—	597

れた素材を用いており、各素材の化学成分を Table 1 に、また、熱処理条件を Table 2 に示す。各熱処理を施した後の各材料の機械的性質は Table 3 に示すとおりである。

2.2 疲労試験片 本研究で用いた疲労試験片の形状および寸法を Fig.1 に示す。T-160 材の最小断面直径 $d = 3\text{mm}$ 、応力集中係数 $\alpha = 1.06$ であり、T-180 材はそれぞれ $d = 4\text{mm}$ 、 $\alpha = 1.08$ である。なお、試験片切欠き部表面は旋削加工した後、#100 の砥石で研削仕上げをしたが、その後、特に研磨は行っていない。

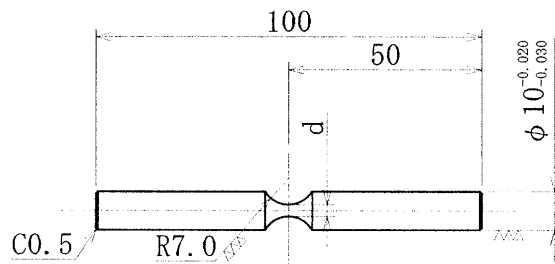


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen.

2.3 実験方法 疲労試験は、本研究室で独自に開発した四連式回転曲げ疲労試験機を用いて実施した。実験環境は室温・大気中とし、試験速度は 3150rpm に設定した。疲労試験実施時の打ち切り繰返し数としては、基本的に $N=10^9$ (ギガサイクル) とした。なお、試験終了後、全ての試験片について SEM により破面観察を行なった。ここで用いた疲労試験機の構造や機能については、別報を参照願いたい。

3 実験結果および考察

3.1 $S-N$ 特性 SNCM439 鋼の T-160 材および T-180 材の疲労試験結果を同一の $S-N$ 線図上に示したのが Fig.2 である。○および△印は表面起点型破壊、◎および△印は明瞭な Fish-eye を伴う内部起点型破壊、●および▲印は明瞭な Fish-eye を伴わない内部起点型破壊を示す。すなわち、両材料の疲労破壊形態については、上記の 3 種類の破壊形態が確認された。また、図から分かるとおり、両材料の $S-N$ 曲線については表面起点型破壊の $S-N$ 曲線が一旦水平に折れ曲った後、 $N=10^6$ 付近から内部起点型破壊の $S-N$ 曲線が新たに発生しており、前述の二重 $S-N$ 特性を示すことが明確に確認される。ただし、内部起点型破壊の $S-N$ 特性について、ギガサイクル領域においても未だ水平部は現れておらず、疲労限度の有無については明らかでない。

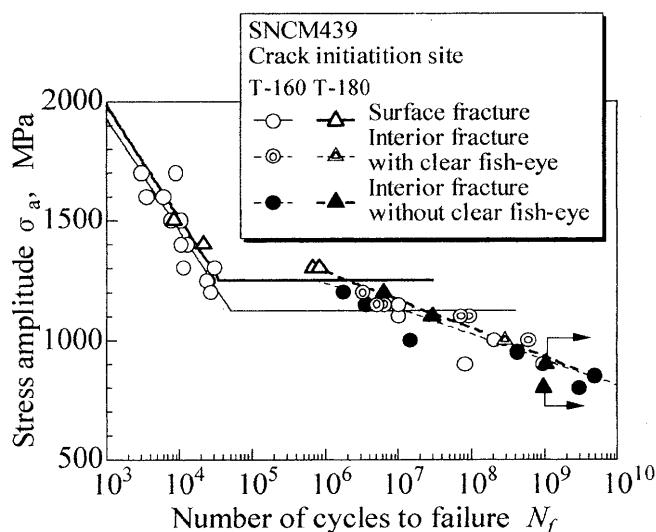
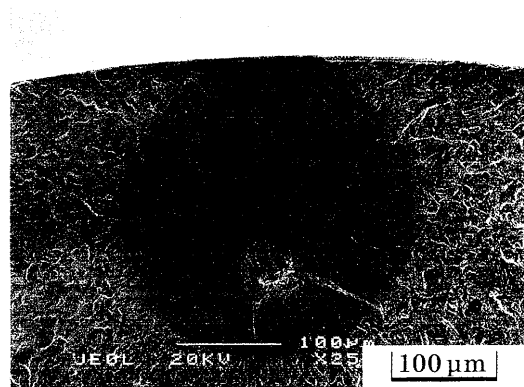


Fig. 2 S-N diagram for SNCM439.

3.2 破面観察

T-160 材で観察された 2 種類の内部起点型破壊の破面写真を Fig.3 に示す。同図(a)より、試験片表面に内接する Fish-eye が明瞭に確認できる。さらに、起点部には、介在物と細粒状領域(Fine Granular Area:FGA)が確認できる。一方、同図(b)より、表面直下の介在物が確認され、このような破壊形態ではき裂が表面にすぐ達するため FGA および Fish-eye は形成されないと考えられる。以上、これらの破壊形態は T-180 材についても同様に確認された。



(a) With clear Fish-eye.



(b) Without clear Fish-eye.

Fig. 3 Fracture surface in interior induced fracture.

3.3 破壊力学的検討 内部起点型破壊について、き裂発生起点付近の疲労メカニズムについて更なる検討を行なうために、破壊力学的観点から定量評価を行なった。まず、介在物深さ d_{inc} と疲労寿命の関係を図 4 に示す。二重印と黒色マークに着目すると、介在物深さが Fish-eye を伴う破壊あるいは Fish-eye を伴わない破壊の分別に依存することが確認できる。つまり、明瞭な Fish-eye を伴わない破壊が生じる条件として、T-160 材は $d_{inc} \leq 12 \mu m$ の時、T-180 材については $d_{inc} \leq 20 \mu m$ の時に限定されることが明らかになった。Fig.5 は ΔK と N_f の関係を示す。疲労寿命は ΔK_{inc} の低下とともに増大し、 ΔK_{FGA} は寿命に無関係に一定値を保持している。

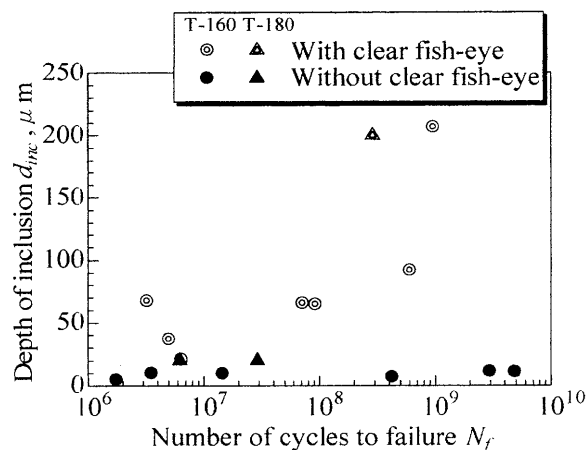


Fig. 4 Correlation of d_{inc} versus N_f .

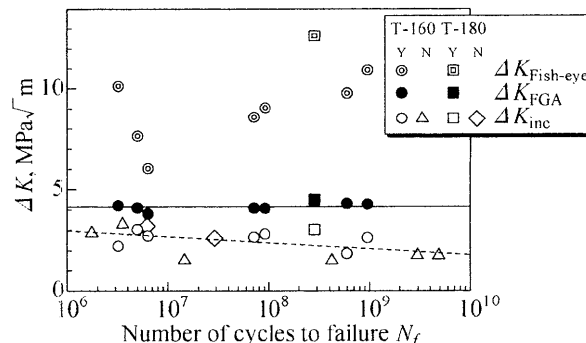


Fig. 5 Correlation of ΔK versus N_f .

4 結 言

- 1) SNCM439 鋼の T-160 材と T-180 材について、ギガサイクル域にわたる超高サイクル疲労特性を実験的に明らかにした。
- 2) 破面観察により、表面起点型破壊および内部起点型破壊の S-N 曲線が別々の場所に現れる二重 S-N 特性が明確に確認された。
- 3) 内部起点型破壊の破面について Fish-eye を伴う場合と伴わない場合に分類でき、この区別は起点となった介在物位置に依存することが分かった。また、破面上の諸情報をもとに破壊力学的考察を加え、疲労破壊メカニズムに関する有用なデータを得た。 <参考文献：略>