

539 高強度鋼SNCM439の超長寿命疲労特性と表面残留応力

電通大 正○松村 隆

電通大 正 越智 保雄

1. 結 言

近年、機器・構造物の高齢化に伴い、 1×10^7 回を越える超長寿命域での部材の疲労特性を解明する必要性が出てきた。特に強度向上を図った高強度材や表面処理材については、S-N 曲線が 1×10^7 回付近から再び降下する二段折れ曲がり現象が既に報告されているが^{1)~7)}、その破壊機構は解明されていない。

そこで、本研究では、日本材料学会疲労部門委員会組織構造分科会の共同研究の一環として、高強度鋼 SNCM439 を用いて 1×10^7 回を越える領域を含めて疲労試験を行い、疲労特性を調べると共に破壊起点を調査した。また、試験片表面について疲労試験前の残留応力を X 線により測定した。

2. 実 験 方 法

2.1 供試材および試験片 供試材は高強度鋼 SNCM439 である。その化学成分を表 1 に示す。試験片は図 1 に示すような最小断面直径 3mm、切欠き半径 7mm、応力集中係数 $\alpha=1.06$ の砂時計型試験片である。丸棒素材から外径粗加工まで行った後、焼きならし($860^\circ\text{C} \times 60\text{min} \rightarrow$ 空冷)、焼入れ($850^\circ\text{C} \times 60\text{min} \rightarrow 40 \sim 60^\circ\text{C}$ 油冷)、焼戻し($160^\circ\text{C} \times 120\text{min} \rightarrow$ 空冷)の熱処理を行った。その後、研削代を残した仕上げ加工を行い、最後に仕上げ研削加工により所定の寸法に仕上げた。切欠部の研削には R7 に整形された #100 砥石を使用し、疲労試験は研削仕上げのまま行った。

2.2 実験方法 疲労試験は、4連式片持回転曲げ疲労試験機を使用した。試験は室温(平均 $21.5 \pm 1.5^\circ\text{C}$ に制御)・大気中で、繰返し速度 3150rpm で行った。打ち切り繰返し数は $N_c = 1 \times 10^9$ とした。ステアケース法による疲労限度の推定は 10 本の試験片を用い、応力階差 $\Delta\sigma = 50\text{MPa}$ 、打ち切り繰返し数 1×10^7 とした。なお、 1×10^7 で未破断の打ち切り試験片は、疲労試験を継続し、試験片が破断するまで試験を行った。試験後、走査形電子顕微鏡(SEM)により破断面の観察を

Table 1 Chemical composition of the material. [mass%]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.40	0.22	0.78	0.020	0.013	0.18	1.78	0.83	0.20

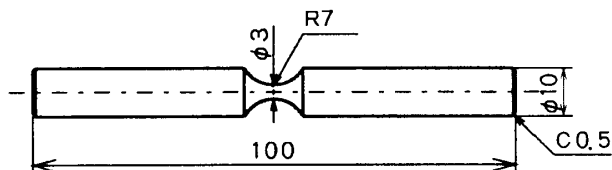


Fig.1 Geometry of the specimen.

Table 2 X-ray condition for stress measurement.

Direction of measurement	axis	circum.
Characteristic X-ray	Cr-K α	
Diffraction	211	
Diffraction angle 2θ , deg	156.4	
Tube voltage, kV	40	
Tube current, mA	70	
Filter	V	
Incident angle, deg	145~165	144~166
Step width, deg	0.04	
Exposure time, sec	900	
Stress constant, MPa/deg	-318.14	

行い、き裂起点の確認を行った。

残留応力の測定は、X 線回折装置[株式会社 RINT-2500]を用い、切欠き底(断面直径 3mm)の対角 2 箇所を一箇所の測定点につき周方向と軸方向の残留応力測定を行った。残留応力の測定に使用した試験片は、17 本である。残留応力測定条件を表 2 に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 S-N曲線 疲労試験から得られた S-N 曲線を図 2 に示す。図 2 より実験結果は、大きく 2 つの領域に分けることができる。○印は、3.2 節で述べるように試験片表面における結晶のすべりから発生したき裂を起点とする表面き裂起点型で、高応力・短寿命域に現れている。一方●印は、3.2 節で述べる試験片内部に起点がありフィッシュ・アイを形成する内部き裂起点型で、低応力・長寿命域に現れる。また $\sigma_a = 1150\text{MPa}$ では、表面き裂起点型と内部き裂起点型の 2 種類が混在している。

ステアケース法により疲労限度を推定した結果、疲労限度の平均値 $\sigma_w = 1100\text{MPa}$ 、標準偏差 $s = 23\text{MPa}$ であった。図 2 に示す水平線は、ステアケース法により求めた σ_w である。

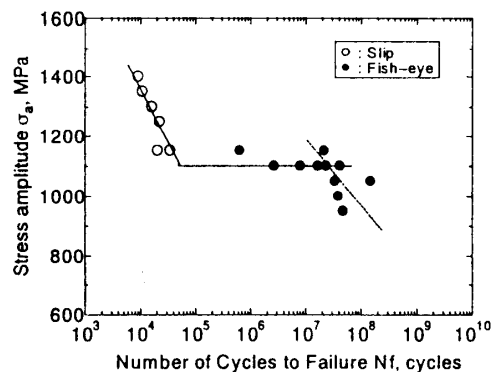


Fig.2 S-N curve.

3・2 破断面観察結果 疲労試験後 SEM による破断面の観察から疲労き裂の発生起点は、次の 2 つのタイプに分類された。

(a)表面き裂起点型破壊→図 3(a)に示すように試験片表面における結晶のすべりから発生したき裂を起点として起こる破壊である。

(b)内部き裂起点型破壊→図 3(b),(c)に示すように試験片内部に起点があり、フィッシュ・アイを伴う破壊である。起点としては、図 3(d)に示すように介在物がき裂起点である場合と、図 3(e)に示すように起点付近に介在物はみられず、破面に段差のみが見られる場合の 2 種類があった。

塩澤らによって報告されているように⁷⁾、内部き裂起点型破壊を起こした全試験片において、介在物の周囲にフィッシュ・アイ領域と表面粗さの異なる凹凸の激しいファセット状の領域が観察された。この観察例を図 3(f)に示す。

3・3 き裂起点の初期応力拡大係数 内部き裂起点型破壊について、き裂起点寸法から初期応力拡大係数 ΔK_{ini} を求めた。はじめに、き裂起点寸法として、介在物面積の平方根 $\sqrt{area}_{inc}$ とファセット面積の平方根 $\sqrt{area}_{facet}$ を求め、この寸法をから村上らによって提案されている次式を用いて初期応力拡大係数 ΔK_{ini} の計算を行った⁸⁾。なお、式(1)中の σ_a は、き裂起点位置での応力振幅であり、式(2)を用いて求めた。ここで、 d は試験片の最小断面部の直径である。

$$\Delta K_{ini} = 0.5 \sigma_a \sqrt{\pi \sqrt{area}} \quad (1)$$

$$\sigma_a = (1 - 2h/d) \sigma_a \quad (2)$$

式(1)を用いて初期応力拡大係数 ΔK_{ini} を計算した結果を図 4 に示す。介在物寸法から求めた $\Delta K_{ini,inc}$ は、2.4~3.6 MPa $\sqrt{m}$ で、データは少ないが、破断繰返し数 N_f の増加とともに減少する傾向が見られる。また、ファセット寸法から求めた $\Delta K_{ini,facet}$ は、3.7~5.1 MPa $\sqrt{m}$ で、破断繰返し数 N_f にかかわらずほぼ一定の傾向を示している。本供試材の表面き裂進展の下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} は、未測定である。しかし、高強度鋼の下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} が 3~6 MPa $\sqrt{m}$ 程度であること⁹⁾、また塩澤らによって報告されているように SUJ2 の場合、 ΔK_{th} は 5 MPa $\sqrt{m}$ で、介在物寸法とファセット寸法から求めた初期応力拡大係数 ΔK_{ini} は、 ΔK_{th} 以下であったこと⁷⁾から推察すると、SNCM439 の場合も ΔK_{ini} は、 ΔK_{th} 以下ではないかと予想される。従って、表面き裂発生に起因する疲労破壊の限界以下において内部き裂が発生・進展していることになるが、現時点で、このき裂の発生進展機構は不明である。

3・4 表面層の残留応力測定結果 X 線による試験片表面層の残留応力の測定結果を表 3 に示す。また、合わせて SUJ2 試験片の残留応力の測定結果も比較のために表 3 に示す。表 3 の測定値は全試験片から測定した残留応力の平均値である。表 3 より SNCM439 には SUJ2 と同程度の高い圧縮残留応力が試験片表面層に存在し、周方向より軸方向の圧縮残留応力が高いことがわかる。この残留応力は、SNCM439 と SUJ2 試験片共に、試験片製作時に #100 砥石を用いた切欠部の研削時に導入されたものである。

結言・参考文献省略

Table 3 Result of residual stress.

Residual stress, MPa		
Material	Axis direction	Circum. direction
SNCM439	-496	-410
SUJ2	-625	-432

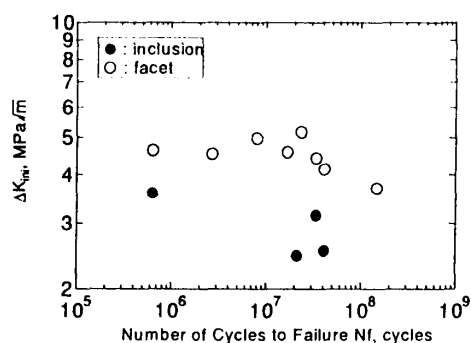


Fig.4 Relationship between stress intensity factor range at crack initiation site and number of cycles to failure.

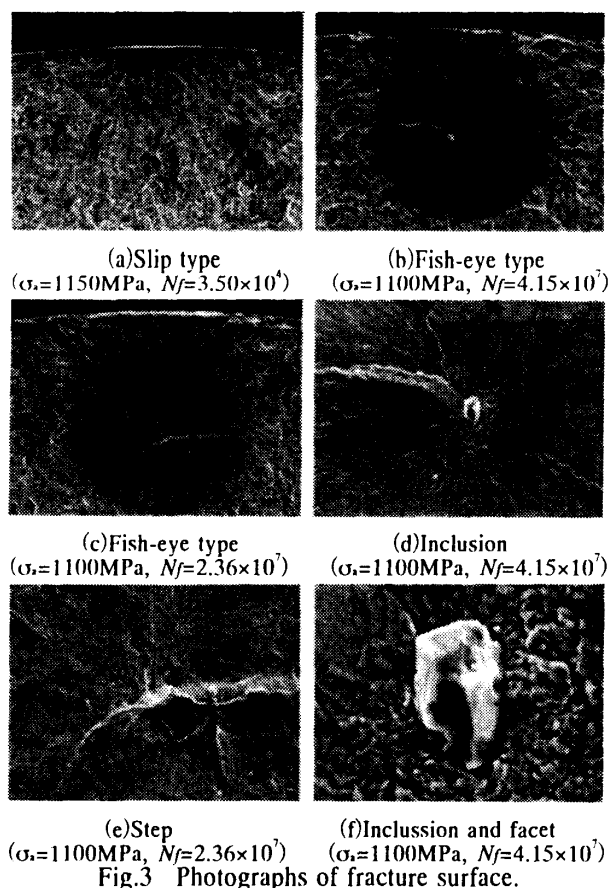


Fig.3 Photographs of fracture surface.