

314 SUJ2 鋼の軸荷重と回転曲げにおける長寿命疲労特性の比較

Comparison of Long-life Fatigue Behavior between Axial Loading and Rotating Bending in SUJ2

正 ○中島 正貴 (豊田高専)

正 井藤賀 久岳 (中日本自動車短大)

正 戸梶 恵郎 (岐阜大工)

正 清水 利弘 (豊田高専)

Masaki NAKAJIMA, Toyota National College of Technology

Hisatake ITOGA, Nakanihon Automotive College

Keiro TOKAJI, Gifu University

Toshihiro SHIMIZU, Toyota National College of Technology

Key Words: Fatigue, High cycle fatigue, High strength steel, Axial loading, Rotating bending

1. 緒 言

高硬度鋼では、低い応力レベルにおいても 10^7 回以上の繰返しに対して材料内部の介在物よりき裂 (fish-eye) を生じ、破壊に至ることが知られている。このことは、機械構造物の疲労限度を基準とした疲労設計や余寿命評価が見直されなければならないことを意味している。

ところで、機械構造物の受ける負荷は曲げや引張・圧縮等様々である。例えば図1に示すように、曲げでは応力勾配があるのに対して、軸荷重では応力勾配が存在しない。すなわち、ここで取り上げる回転曲げと軸荷重では試験片断面に作用する応力の分布に違いがあり、ある一定以上の応力が作用している部分を危険体積として考えると、回転曲げでは応力勾配のために、外側のリング状の領域が危険体積となるのに対して、軸荷重では応力勾配がないため断面全体が危険体積となる。したがって、危険体積の大きい軸荷重疲労試験片のほうが、より大きい介在物を含みやすく、その中の最大のものから内部き裂 (fish-eye) が発生すると考えられることから、軸荷重が回転曲げよりも低い疲労強度を示すことが予想される。

そこで本研究では、高強度鋼 SUJ2 を用いて長寿命軸荷重疲労試験を実施し、回転曲げ疲労試験結果との比較を通じて疲労挙動に及ぼす負荷形式の影響について検討した。

2. 実験方法

2.1 材料 供試材は高炭素クロム軸受け鋼 (JIS SUJ2) であり、その化学成分 (mass%) は、C:1.01, Si:0.23, Mn:0.36, P:0.012, S:0.007, Cu:0.006, Ni:0.04, Cr:1.45, Mo:0.02, Fe: Bal. である。材料には 1108K より油焼入れ後、453K 空冷焼

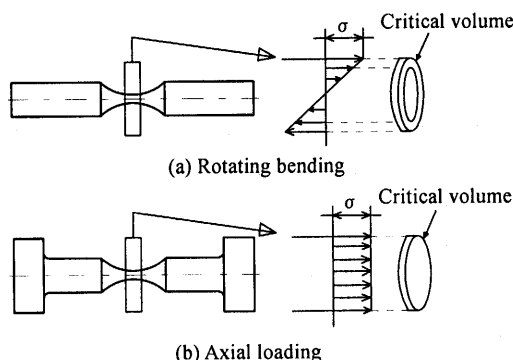


Fig.1. Loading condition and critical volume.

戻しの熱処理を施した。熱処理後の機械的性質は、引張強さ $\sigma_B=2316\text{MPa}$ 、伸び $\delta=2\%$ 、絞り $\phi=0.4\%$ 、ビッカース硬さ $HV=746\sim795$ (平均: 760) である。

この材料から図2に示す形状の疲労試験片を機械加工した。試験片最小断面部の直径は回転曲げ疲労試験片と同様の 3mm であり、応力集中係数は $K_t=1.04$ である。

2.2 実験方法 軸荷重疲労試験を室温大気中において 4 連式軸荷重疲労試験機 (繰返し速度 $f=80\text{Hz}$) を用いて行った。応力比は $R=-1$ と $R=0.05$ である。試験後、すべての試験片の破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) によって詳細に観察し、介在物や粒状領域等の寸法を測定した。

3. 実験結果

3.1 S-N 曲線 軸荷重疲労試験により得られた S-N 曲線を図3に示す。なお、縦軸の応力は最大応力 σ_{\max} である。図には比較のため、回転曲げ荷重下で得られた S-N 曲線 (実

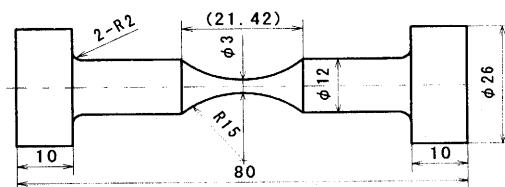


Fig.2. Configuration of fatigue specimen.

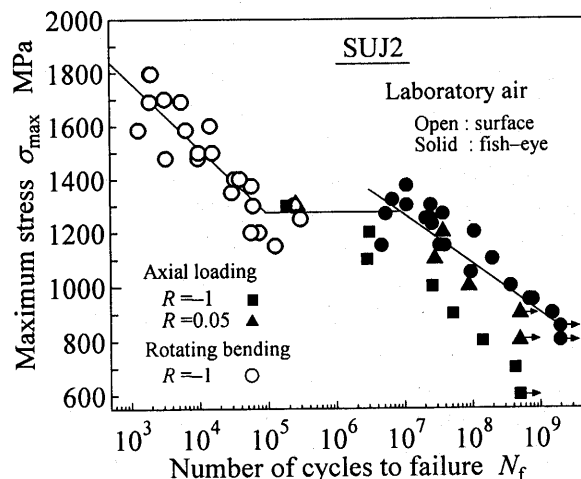


Fig.3. S-N diagram.

線および丸印)も併記した。なお、本研究では打ち切り繰返し数を $N=5 \times 10^8$ 回とした。また試験機の容量の関係から、 $\sigma_{\max} < 1300 \text{ MPa}$ の応力域で結果が得られている。図から明らかのように、 $R=0.05$, $\sigma_{\max}=1300 \text{ MPa}$ の結果を除いて、すべて内部起点型破壊であった。 $\sigma_{\max} < 1300 \text{ MPa}$ では、疲労寿命は回転曲げが最も長く、次いで $R=0.05$, $R=-1$ の順である。また、軸荷重において、打ち切り繰返し数に対する未破断応力を比較すると、 $R=0.05$ では 900 MPa , $R=-1$ では 600 MPa である。一方、回転曲げの場合、 $N=5 \times 10^8$ 回の繰返し数に対応する応力は $950 \sim 1000 \text{ MPa}$ であり、回転曲げと比べて軸荷重の疲労強度の低下が明らかである。

3.2 介在物と粒状領域の極値統計 図4に内部起点型破壊の起点となった介在物と粒状領域の極値統計グラフを示す。軸荷重の場合、介在物寸法の分布は回転曲げ荷重下のものより寸法の大きい側に位置している。しかし、危険体積が大きいにもかかわらず、起点となった介在物寸法は回転曲げの場合とほぼ同程度である。一方、粒状領域の寸法の分布は両荷重下でほとんど一致しており、相違は見られない。このことから、粒状領域から、fish-eye への遷移が負荷形式に依存しないことが示唆される。

4. 考 察

4.1 破壊起点となった介在物および粒状領域の寸法を用いた疲労限度の予測 本実験で得られた打ち切り繰返し数に対する未破断応力と村上らによる $\sqrt{\text{area}}$ パラメータモデルを用いて得られる疲労限度 σ_w を比較した。計算には次式を用いた。

$$\sigma_w = \frac{1.56(HV + 120)}{(\sqrt{\text{area}})^{1/6}} \quad (1)$$

軸荷重の場合、実際に起点となった介在物寸法の $6.3 \sim 23.7 \mu\text{m}$ とビッカース硬さの平均値 ($HV=760$) を用いて計算したところ、 $\sigma_w=1010 \sim 810 \text{ MPa}$ が得られた。一方、粒状領域の $12.8 \sim 37.5 \mu\text{m}$ に対して求めると、 $\sigma_w=898 \sim 750 \text{ MPa}$ であった。いずれの結果も $R=-1$ における実験結果 ($600 \sim 700 \text{ MPa}$) と一致しなかった。

回転曲げについて同様の推定を行った (平均ビッカース硬さ: 778)。起点となった介在物寸法の $5.3 \sim 21.5 \mu\text{m}$ に対して $\sigma_w=1061 \sim 840 \text{ MPa}$, 粒状領域の $6.5 \sim 45.4 \mu\text{m}$ に対して $\sigma_w=1025 \sim 742 \text{ MPa}$ が得られ、いずれの結果も $N=2 \times 10^9$ 回の打ち切り繰返し数に対する実験結果 ($850 \sim 900 \text{ MPa}$) をその範囲内に含んでいた。しかし、打ち切り繰返し数に対する未破断応力が疲労限度か否か不明であるので、内部起点型破壊に対する疲労限度についてはさらなる検討が必要である。

4.2 極値統計に基づく疲労限度の推定 図4に示す極値統計グラフより介在物および粒状領域の最大値を推定し、疲労限度の予測を行った。ここで、再帰期間の決定の手順は村上によって示された手法に従っている。得られた再帰期間を用いて、Fig.4のそれぞれの分布直線から介在物および粒状領域の最大値を計算した。

軸荷重および回転曲げの両負荷形式について、介在物および粒状領域の最大値と予測疲労限度をそれぞれ Table I (a)および(b)に示す。軸荷重の場合、予測された最大介在物寸法の $42.1 \mu\text{m}$ に対して、疲労限度は $\sigma_w=724 \sim 765 \text{ MPa}$ となり、 $R=-1$ における実験結果 ($600 \sim 700 \text{ MPa}$) と一致しない。

一方、粒状領域については、予測最大寸法の $62.5 \mu\text{m}$ に対して $\sigma_w=678 \sim 716 \text{ MPa}$ となり、実験結果とほぼ一致する。

同様に回転曲げの場合、介在物および粒状領域のいずれの推定結果も、 $N=2 \times 10^9$ 回の打ち切り繰返し数に対する実験結果 ($850 \sim 900 \text{ MPa}$) を大きく下回っている。しかし、内部き裂発生に関する前報の結果から、 $N=10^9$ 回の繰返し数に対する粒状領域の発生応力が $650 \sim 700 \text{ MPa}$ であることが明らかになっており、Table I (b)における粒状領域に関する推定結果 ($649 \sim 683 \text{ MPa}$) はその範囲内にある。したがって、粒状領域に対する極値統計に基づく疲労限度の推定は、妥当なものであると判断される。

(結言、参考文献省略)

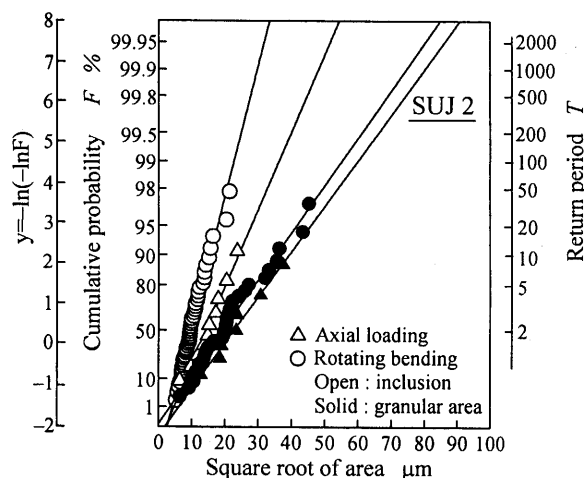


Fig.4. Extreme value distribution of sizes of inclusion and granular area.

Table I Fatigue limits in (a) axial loading and (b) rotating bending estimated by statistics of extremes.

(a) Axial loading

Return period	Inclusion :	Granular area :
	$T_{inc} = 332$ $\sqrt{\text{area}} = 42.1 (\mu\text{m})$	$T_{ga} = 148$ $\sqrt{\text{area}} = 62.5 (\mu\text{m})$
Hardness (HV)	Fatigue limit : σ_w (MPa)	
Max.	795	765
Min.	746	724
Ave.	760	736

(b) Rotating bending

Return period	Inclusion :	Granular area :
	$T_{inc} = 9196$ $\sqrt{\text{area}} = 36.0 (\mu\text{m})$	$T_{ga} = 3391$ $\sqrt{\text{area}} = 83.5 (\mu\text{m})$
Hardness (HV)	Fatigue limit : σ_w (MPa)	
Max.	795	786
Min.	750	747
Ave.	778	771