

高強度鋼の長寿命疲労特性に及ぼす負荷形式の影響

Effect of Loading Condition on Long-life Fatigue Behavior of High Strength Steel

○正 井藤 賀久 岳 (中日本自動車短大) 正 中島 正 貴 (豊田高専)
 正 戸 梶 恵 郎 (岐阜大工) 正 清水 利 弘 (豊田高専)
 Hisatake ITOGA, Nakanihon Automotive College, Sakahogi-cho, Kamo-gun, Gifu
 Masaki NAKAJIMA, Toyota National College of Technology
 Keiro TOKAJI, Gifu University
 Toshihiro SHIMIZU, Toyota National College of Technology

Key Words: Fatigue, High Strength Steel, Step-Wise $S-N$ Curve, Loading Type, Fracture Mode

1. 結 言

高強度鋼や表面処理材では、繰返し数 $10^6 \sim 10^7$ 回以上の長寿命域において内部起点型破壊が生じる。破壊起点は材料中に含まれる非金属介在物であり、粒状領域 (Granular area), fish-eye の形成を経て破壊に至ることが知られている。こうした破壊の発生は、従来行われてきた機械・構造物の疲労限度を基準とした疲労設計法や余寿命評価法の意味を失わせることになるので、きわめて深刻な問題を引き起こしている。

ところで、機械構造物の受ける負荷は軸荷重や曲げ等様々である。周知のとおり、軸荷重では応力勾配が無く、曲げでは存在する。こうした応力勾配の有無は、内部起点型破壊の発生に影響を及ぼす重要な因子である。すなわち、軸荷重の場合、断面全体が危険体積となるのに対して、曲げの場合、中立軸付近では作用応力が小さいために、仮に大きな介在物が存在しても破壊に関与しない。したがって、曲げの場合、危険体積は表面付近のみとなり、本研究で取り扱う丸棒試験片では、その形状はリング状となる。これらのことより、同じ形状の最小断面部を持つ試験片では、回転曲げに比べて軸荷重の危険体積は大きく、その中により大きな介在物を含む可能性が高くなり、その結果、内部起点型破壊が生じ易くなる。また、回転曲げと比べて軸荷重の疲労強度は低くなることが予想される。

そこで本研究では、同様の最小断面部を有する高強度鋼 SUJ2 の試験片を用いて軸荷重疲労試験および回転曲げ疲労試験を実施し、得られた結果を比較することによっ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 試験片

供試材は高炭素クロム軸受鋼 (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・40 分保持後油焼入れに続いて、453K・2 時間保持後空冷の熱処理を施した。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 $HV746 \sim 795$ (平均値: 760) である。

熱処理後、図 1(a) に示す試験片形状に機械加工した。参考のために、回転曲げ試験片の形状寸法を図 1(b) に示す。いずれの試験片も最小断面部直径は 3mm であり、応力集中係数 K_t は、軸荷重試験片では 1.04, 回転曲げ試験片では 1.06 である。

2.2 実験方法

軸荷重試験には 4 連式軸荷重疲労試験機 (繰返し速度 $f = 80 \text{ Hz}$) を用いた。なお、回転曲げ試験には 4 連式回転曲げ疲労試験機 (繰返し速度 $f = 52.5 \text{ Hz}$) を用い、両試験とも

室温大気中で行った。また、軸荷重試験の応力比は $R = -1$ および $R = 0.05$ の 2 種類である。

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、介在物および粒状領域の定量的評価を行った。

3. 実験結果

3.1 $S-N$ 曲線

最大応力 σ_{\max} で表した疲労試験結果を図 2 に示す。破面観察の結果に基づいて、表面起点型破壊を中空印, fish-eye を伴う内部起点型破壊を中実印で表した。軸荷重の場合、打ち切り繰返し数を $N = 5 \times 10^8$ 回とし、試験機の容量の関係から $\sigma_{\max} \leq 1300 \text{ MPa}$ で試験を行った。その結果、一例 ($R = 0.05$,

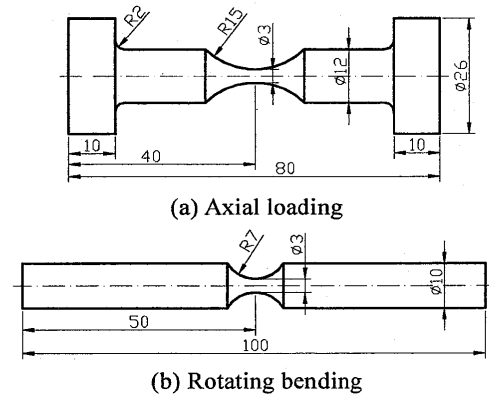


Fig.1. Configurations of fatigue specimens.

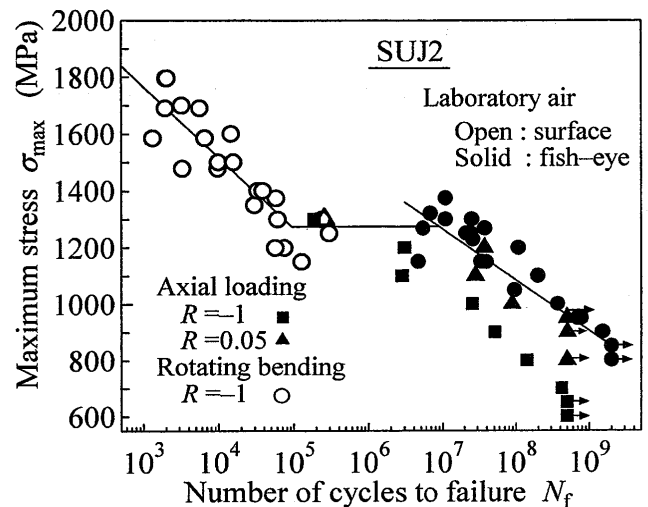


Fig.2. $S-N$ diagram.

$\sigma_{max}=1300\text{MPa}$)を除くすべての試験片で内部起点型破壊が生じた。一方、回転曲げの場合、打ち切り繰返し数を $N=2 \times 10^9$ 回としたが、高応力・短寿命域では表面起点型破壊、低応力・長寿命域では内部起点型破壊が生じた。

内部起点型破壊の領域において両試験結果を比較すると、軸荷重よりも回転曲げの疲労寿命が長く、軸荷重の場合、 $R=0.05$ の疲労寿命が $R=-1$ よりも長い。また、軸荷重の場合、打ち切り繰返し数である $N=5 \times 10^8$ 回における未破断応力は $R=0.05$ では 950MPa 、 $R=-1$ では 650MPa であり、回転曲げの場合の同じ繰返し数における応力に比べて明らかに低い。

3.2 破壊起点となった介在物の寸法の分布

破壊起点となった介在物寸法の頻度分布を図3に示す。軸荷重の場合、介在物寸法 $\sqrt{area}=15\sim 18\mu\text{m}$ の頻度が最も高いのに対して、回転曲げの場合、 $\sqrt{area}=9\sim 12\mu\text{m}$ が最も高い。また SEM 観察結果から、回転曲げの場合、破壊起点となった介在物の試験片表面からの深さは $175\mu\text{m}$ 以下であることが確認された。この結果から、応力勾配の存在のために、試験片表面近傍の介在物のみが破壊起点として作用したことがわかる。一方軸荷重の場合、試験片中心まで同じ応力が作用しているため、危険断面のいずれの介在物も破壊起点となることが可能である。したがって、軸荷重の場合、回転曲げと比べて危険体積が大きく、より大きな介在物がある中に存在する確率が高くなるため、図3のような結果が得られたものと考えられる。

図4は介在物および粒状領域の寸法の極値統計グラフである。□印のデータは検査基準面積 $S_0=0.078\text{mm}^2$ として測定された介在物寸法の分布である。また、実際に内部破壊起点となった介在物(△印、○印)および粒状領域の寸法(▲印、●印)の分布も併記した。材料中に含まれる介在物寸法の分布(□印)と比べて、破壊起点となった介在物寸法は明らかに大きい側に分布している。また、回転曲げよりも軸荷重下で破壊起点となった介在物の寸法は大きい。一方、粒状領域の寸法は両荷重下ではほぼ同程度であり、顕著な差異は認められない。すなわち、粒状領域から fish-eye への遷移は負荷形式に依存しない。

4. 考察

4.1 \sqrt{area} パラメータモデルによる疲労限度の推定

村上らによる \sqrt{area} パラメータモデルを用いて疲労限度 σ_w の推定を行った。計算には次式を用いた。

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

軸荷重の場合、破壊起点となった介在物の寸法 $\sqrt{area}=5.9\sim 18.2\mu\text{m}$ とピッカース硬さの平均値 $HV760$ を用いると、 $\sigma_w=846\sim 1021\text{MPa}$ が得られる。また、粒状領域の寸法 $\sqrt{area}=12.8\sim 30.7\mu\text{m}$ を用いると、 $\sigma_w=776\sim 898\text{MPa}$ である。いずれの結果も、実験結果の未破断応力 $\sigma=650\text{MPa}$ ($R=-1$) より大きい。

一方回転曲げの場合、介在物の寸法 $\sqrt{area}=5.3\sim 21.5\mu\text{m}$ とピッカース硬さの平均値 $HV778$ を用いると、 $\sigma_w=840\sim 1061\text{MPa}$ が得られる。また、粒状領域の寸法 $\sqrt{area}=6.5\sim 45.4\mu\text{m}$ を用いると、 $\sigma_w=742\sim 1025\text{MPa}$ である。いずれの結果も、実験結果の未破断応力 $\sigma=850\sim 900\text{MPa}$ をその範囲内に含んでいる。しかし、著者らは 10^9 回の繰返しに対して $\sigma=650\sim 700\text{MPa}$ において粒状領域が発生することを確認している。以上の結果から、介在物および粒状領域寸法のいずれを用いても、 \sqrt{area} パラメータモデルは危険側の推定

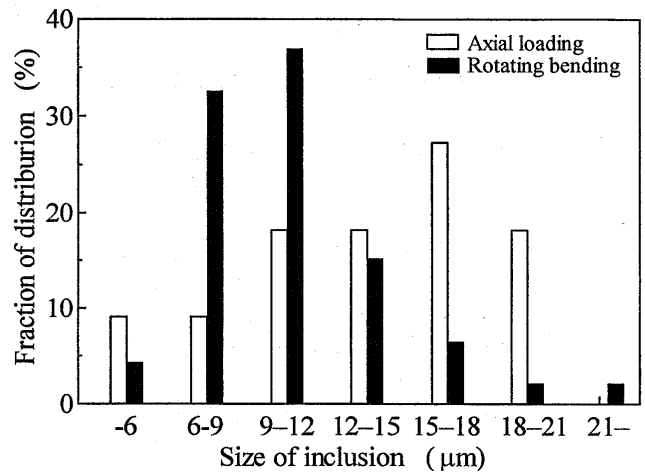


Fig.3. Distribution of inclusion size.

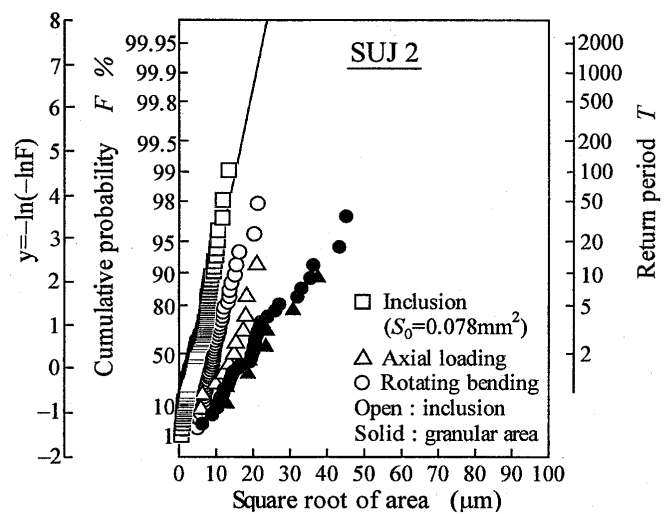


Fig.4. Extreme value distribution of sizes of inclusion and granular area.

を与えることがわかった。

4.2 極値統計による疲労限度の推定

図4に示す極値統計から介在物の最大値を推定し、疲労限度の推定を試みた。基準体積を計算するために、試験片に含まれる介在物の寸法の中央値 ($F=50\%$, $5.3\mu\text{m}$) を用いて厚さを求めた。その結果、基準体積は $V_0=0.000414\text{mm}^3$ である。

軸荷重の場合、最小断面部(直径 3mm)全体が危険体積となり、その体積は $V=0.0375\text{mm}^3$ 、再帰期間は $T=90.6$ 、介在物寸法は $\sqrt{area}=14.7\mu\text{m}$ である。その結果、推定疲労限度は $\sigma_w=877\text{MPa}$ となり、実験結果の未破断応力 $\sigma=650\text{MPa}$ よりもかなり大きい。

一方、回転曲げの場合、危険体積はリング状であり、表面からの深さを $175\mu\text{m}$ として推定を行った。その結果、体積は $V=0.00823\text{mm}^3$ 、再帰期間は $T=19.9$ 、介在物寸法は $\sqrt{area}=11.0\mu\text{m}$ であり、その結果、推定疲労限度は $\sigma_w=939\text{MPa}$ である。この結果も未破断応力 $\sigma=850\sim 900\text{MPa}$ よりも大きい。このように両荷重下とも、推定結果は危険側となる。このことは内部起点型破壊に対する疲労限度推定に問題が残されていることを示している。

(結言・参考文献省略)