

1347 高炭素クロム軸受鋼SUJ2の超長寿命軸疲労特性に及ぼす応力比の影響 The Influence of Stress Ratio on Super-Long-Life Fatigue Behavior in High Carbon-Chromium Bearing Steel, SUJ2

正 塩澤 和章 (富山大) 正 西野 精一 (富山大工) ○学 長谷川 貴之 (富山大院)

Kazuaki SHIOZAWA and Seiichi NISHINO, Toyama University, Gofuku, Toyama, 930-8555
Takayuki HASEGAWA, Graduate Student, Toyama University

In this study, fatigue tests were performed to investigate of the influence of stress ratio on super-long-life fatigue properties of high-carbon chromium bearing steel (SUJ2) under axial loading at three different stress ratios, R , -1 , 0 and 0.5 . From the experimental results, interior inclusion induced fracture occurred in each stress ratio and the fatigue life of subsurface fracture mode under axial loading was decreased as compared with that of rotating bending fatigue tests. The granular bright facet (GBF) area was observed in the vicinity of the inclusion of fracture origin in the long life region of $N_f > 10^6$ cycles, the roughness of the GBF area correlated with the stress intensity factor range of the inclusion.

Key Words : Fatigue, Super-Long-Life, Axial Loading, S - N Curve, Stress Ratio, Fish-eye, SUJ2

1. 緒言

近年、機械構造物の高速化・耐久化に伴い、材料の破断繰返し数が 10^7 回を超える超長寿命域での疲労特性を解明することが重要とされてきた。最近では高強度鋼や表面改質鋼の回転曲げ疲労試験において、高応力振幅・短寿命域の表面き裂発生型破壊に対する S - N 曲線と、低応力振幅・長寿命域の内部き裂発生型破壊に対する S - N 曲線の二重の S - N 曲線が存在することが報告されている⁽¹⁾。しかしながら、疲労の研究の多くは実験技術上の制約から回転曲げ疲労条件のものであり、軸疲労条件での研究例はあまり多くない。特に、長寿命域での疲労破壊に重要な役割を果たすことが報告されている内部き裂発生起点となった介在物周囲の粒状で凹凸の大きい領域 (Granular Bright Facet, GBF) の形成に及ぼす応力比の影響に関する研究例はほとんどない。

本研究では、高炭素クロム軸受鋼SUJ2を用いて軸疲労試験を行い、超長寿命域の疲労特性に及ぼす応力比の影響について検討した。

2. 供試材および実験方法

本研究で用いた材料は高炭素クロム軸受鋼 (JIS SUJ2) であり、その化学組成を表1に示す。供試材には真空炉中で1008K-2.4ks加熱後油焼入れ (353K) および453K-1.2ksで焼戻し (空冷) を施した。試験片は最小断面直径3mmの砂時計型であり、応力集中係数 α は1.029である。なお、供試材のピッカース硬さは749HVである。本実験には試験軸数が4軸の多連式軸荷重疲労試験機 (東京衡機製) を使い、室温・大気中で疲労試験を行った。繰返し速度は80Hzとし、応力比 ($\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$) $R=-1, 0, 0.5$ の3条件とした。

3. 実験結果及び考察

3.1 S - N 曲線 疲労試験で得られた S - N 曲線を図1に示す。図中のオープンマークが表面き裂発生型破壊、ソリッドマークが介在物を有する内部き裂発生型破壊、二重マークが内部き裂発生型破壊でき裂発生起点となった介在物周囲にGBF領域が観察された結果を示している。また、破線及び一点鎖線はそれぞれ同材料の回転曲げ疲労試験から得られた表面き裂発生型破壊と内部き裂発生型破壊の S - N 曲線を示している⁽²⁾。図より、いずれの応力比条件でも内部き裂発生型破壊を生じており、破断繰返し数が 10^6 回以上の破面にはGBF領域が認められた。 $R=-1$ の結果より、回転曲げ疲労試験結果と比較して、軸疲労条件下での内部き裂発生型破壊の寿命は短寿命である。

3.2 破面観察結果 図2に走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた破面観察例を示す。いずれの応力比条件でも内部き裂発生型破壊を生じた破面にはフィッシュアイが観察され、 10^6 回以上で内部き裂発生型破壊を生じた破面のき裂発生起点となった介在物周囲にはGBF領域が認められ

た。また、図2のSEM写真の白線位置の破面粗さプロファイルを図中に示した。図より、GBF領域はフィッシ

Table 1. Chemical composition of SUJ2 (mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Ni	Mo	[O]
1.01	0.23	0.36	0.012	0.007	1.45	0.06	0.04	0.02	8ppm

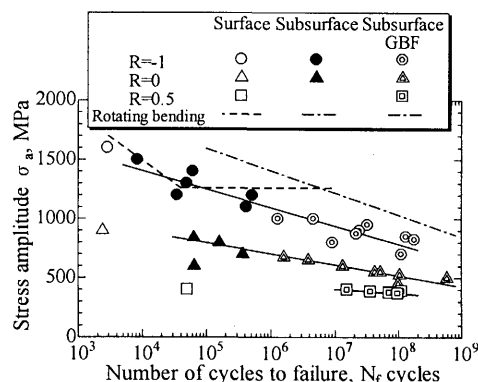


Fig. 1 S - N diagram.

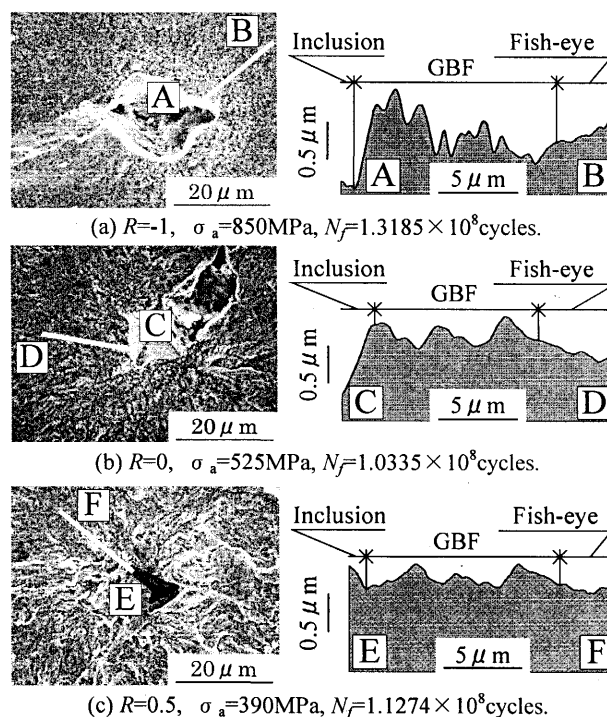


Fig. 2 SEM micrographs of GBF area and cross sectional profile.

ユアイ領域と比較して大きな凹凸を生じており、応力比が大きい程、凹凸の間隔が広くなり粗さは低下している。

内部き裂発起点となった介在物の試験片表面からの距離 d_{inc} を図3に示す。図中の斜線領域は回転曲げ疲労試験で報告されている d_{inc} の範囲⁽²⁾を示している。図より、 d_{inc} は40~1300 μm に分布し、回転曲げ疲労試験の結果 (20~240 μm) よりも広い範囲にあり、寿命や応力比による影響は認められなかった。また、内部き裂発起点となった介在物の寸法 $\sqrt{\text{area}_{inc,i}}$ 及びGBF領域の寸法 $\sqrt{\text{area}_{GBF}}$ を図4に示す。図中の実線及び破線はそれぞれ本実験で得られた軸疲労試験及び回転曲げ疲労試験で得られた $\sqrt{\text{area}_{inc,i}}$ の平均値⁽²⁾を示す。図より、 $\sqrt{\text{area}_{inc,i}}$ は応力比による影響は認められず、平均は軸疲労条件下では17 μm であり、回転曲げ疲労条件下の平均 (9 μm) より大きい。したがって、前述した軸疲労条件下での内部き裂発生型破壊の疲労寿命が回転曲げ疲労のそれと比較して短寿命であった原因は、試験片断面に応力勾配がないため、高応力にさらされる危険体積が回転曲げ疲労条件と比較して大きく、この中に含まれる大きな介在物の存在確率が高くなるためであると考えられる。

3.3 き裂発起点の破壊力学的検討 内部き裂発起点となった介在物及びGBF領域の寸法を用いて、村上⁽³⁾による次式から応力拡大係数範囲 ΔK^* を求めた。

内部き裂発生型の介在物寸法 ($\sqrt{\text{area}_{inc,i}}$) に対して：

$$\Delta K_{inc,i}^* = 0.5\sigma\sqrt{\pi\sqrt{\text{area}_{inc,i}}} \quad \dots (1)$$

GBF寸法 ($\sqrt{\text{area}_{GBF}}$) に対して：

$$\Delta K_{GBF}^* = 0.5\sigma\sqrt{\pi\sqrt{\text{area}_{GBF}}} \quad \dots (2)$$

ここでは、式(1)及び(2)の σ に引張側の応力幅 ($R=-1$ に対しては σ_a 、 $R=0$ と 0.5 に対しては $\sigma_{max}-\sigma_{min}$) を代入した。図5に $\Delta K_{inc,i}^*$ 及び ΔK_{GBF}^* と破断繰返し数 N_f との関係を示す。図中の斜線領域及び薄墨領域はそれぞれ回転曲げ疲労試験で報告されている ΔK_{inc} 及び ΔK_{GBF} の範囲である⁽²⁾。図より、 $\Delta K_{inc,i}^*$ は多少ばらつきがあるが、応力比に依存せず破断繰返し数の増加に伴い低下しており、回転曲げ疲労試験の結果とほぼ対応している。また、 $\Delta K_{inc,i}^*$ が4~5 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下の場合にはGBF領域が存在し、 ΔK_{GBF}^* の値は応力比や破断繰返し数によらずほぼ一定である。したがって、軸疲労条件下での介在物からの内部き裂発生やGBF領域形成に関する破壊力学的条件は回転曲げ疲労条件下でのそれと同様であると考えられる。

3.4 GBF領域の粗さ測定結果 三次元解析システムを用いてGBF領域の粗さ測定を行い、応力比によるGBF様相の違いについて検討した。得られたGBF領域の中心線平均粗さ R_a 、最大粗さ R_{max} 及び局部的山頂の平均間隔 S とき裂発起点となった介在物の応力拡大係数範囲 $\Delta K_{inc,i}$ との関係を図6に示す。なお、 $\Delta K_{inc,i}$ は式(1)の σ に最大応力と最小応力の差 ($\sigma_{max}-\sigma_{min}$) を代入して算出した値である。図より、 R_a 、 R_{max} 及び S は $\Delta K_{inc,i}$ との間に相関性がみられ、それぞれ直線関係が認められる。

4. 結言

高炭素クロム軸受鋼SUJ2を用いて三種類の応力比条件下で軸疲労試験を行った結果、以下のことが明らかとなった。

(1) いずれの応力比条件下でも内部き裂発生型破壊を生じ、破断繰返し数が 10^6 回以上の破面にはき裂発起点となった介在物周囲にGBF領域が観察された。

(2) 引張り側の応力幅で求めた応力拡大係数 $\Delta K_{inc,i}^*$ は応力比によらず破断繰返し数に伴い低下する。また、 $\Delta K_{inc,i}^*$ が4~5 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下の場合には介在物周囲にGBF領域が形成され、 ΔK_{GBF}^* の値は応力比によらず4~6 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ となる。

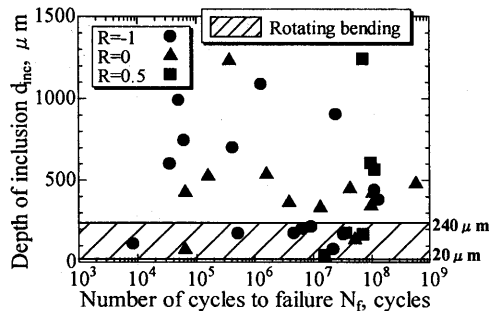


Fig.3 Relationship between depth of inclusion and N_f .

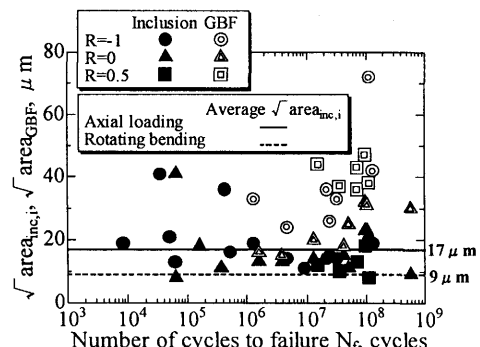


Fig.4 Relationship between size of inclusion and GBF, and N_f .

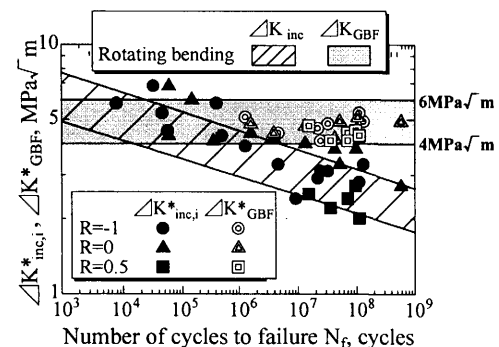


Fig.5 Relationship between stress intensity factor of crack initiation site and N_f .

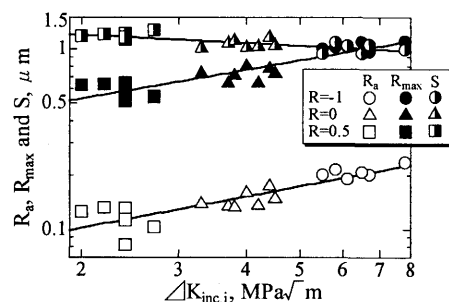


Fig.6 Relationship between R_a , R_{max} and S , and stress intensity factor range of crack initiation site.

(3) GBF領域の粗さや局部的山頂の平均間隔 S と介在物寸法から求めた応力拡大係数範囲 $\Delta K_{inc,i}$ には相関性がみられ、応力比によらず $\Delta K_{inc,i}$ が大きい程GBF領域の粗さが大きく、 S が小さくなることが明らかとなった。

参考文献

- (1) 例えば、塩澤和章, 日本機械学会誌, 103-981, (2000), 494-495.
- (2) 塩澤和章, 魯 連涛, 石原外美, 材料, 48, (1999), 1095-1100.
- (3) 村上敬宜, 児玉昭太郎, 小沼静代, 機論, 54-500, A(1988), 668-698.