

高炭素クロム軸受鋼の超広寿命域における 回転曲げ疲労特性について

立命館大学

酒井達雄

立命館大学[院]

○武田光弘

立命館大学[院]

榎原正仁

光洋精工(株)

小熊規泰

1. 緒言

高強度鋼の疲労強度や疲労寿命は一般に大きなばらつきを伴い、これらの材料を用いた製品の信頼性保証の観点から、このようなばらつきを含めた疲労特性の定量的解明が必要となる。近年、高強度鋼の疲労特性について、 10^7 回以上の長寿命域で $S-N$ 曲線が再び低下するような二段折れ曲り現象がしばしば報告されている。^{1) 2)} しかし、このような高強度鋼に関する低サイクル領域の疲労特性はまだ明らかにされていないのが現状である。以上の観点から、本研究では高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)について $N=1$ 回 $\sim N=10^9$ 回にわたる超広寿命域における疲労試験を実施して、極低サイクル領域を含めた、全領域にわたる疲労特性の全体像を明らかにした。

2. 供試材および実験方法

2・1 供試材

本研究に用いた材料は高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)であり、その化学組成を Table.1 に示す。試験片は Fig.1 に示す形状の最小断面部直径 3mm の砂時計型試験片であり、応力集中係数は $\alpha=1.06$ である。試験片は $\phi 14.3$ mm の丸棒より切出し、仕上げ寸法より 0.1mm だけ大きめに旋削加工した後、真空炉中で $835^\circ\text{C}\times 40\text{min}$ 保持後油冷 (80°C) の焼入れ、 $180^\circ\text{C}\times 120\text{min}$ 保持後空冷の焼戻しを行った。その後、研磨により所定の寸法に仕上げた。熱処理後の試験片のビッカース硬さは試験片表面より内部までほぼ均一であり、Hv750 $\sim$ 795 の範囲内であった。

2・2 疲労試験方法

疲労試験は独自に開発した 4 連式片持回転曲げ疲労試験機³⁾を用い、室温・大気中の実験室雰囲気の下で実施した。中サイクル域および高サイクル域の疲労試験については、繰返し速度を 3150rpm とし、応力振幅 $\sigma_a=1700\text{MPa}$ より 100MPa 間隔で順次応力振幅を低下させながら一応力レベル当たり 4 本の試験片を割り当てて実験を実施し、 10^7 回で破断に至らない応力レベルに達した時点でステアケース法による疲労限度の推定実験に切り替えた。ステアケース法は 10^7 回を打ち切り繰返し数とし、応力階差を $\Delta\sigma=50\text{MPa}$ に設定して 10 本の試験片について実施した。なお、 10^7 回で未破断の試験片はその後で実験を継続し、試験片が破断するまで実験を行った。その後、 $\sigma_a=1800\text{MPa}$ で 1 本、 $\sigma_a=1300\text{MPa}$ および 1250MPa で複数本の疲労試験を行うと共に、上記のステアケース法で推定された疲労限度(表面き裂発生型疲労破壊の限界)以下の応力レベルで実験を行った。

他方、低サイクル域に関する疲労試験については、

疲労寿命が短いことや応力振幅が大きくなることを考慮して、1 回転毎の疲労寿命の計測が可能なカウンターや、負荷と同時に疲労試験機を始動させるダッシュポットセンサーを用いた上で、繰返し速度を低速 1050rpm とし、一応力レベル当たり 2 本の試験片を割り当てて、応力振幅 $\sigma_a=1800\text{MPa}$ より 50MPa 間隔で応力を順次上げながら $\sigma_a=2000\text{MPa}$ まで行った後、応力階差を $\Delta\sigma=200\text{MPa}$ に設定して $\sigma_a=2800\text{MPa}$ まで行った。その後、 $\sigma_a=2300\text{MPa}$ 、 2100MPa および 2050MPa で複数本の疲労試験を行った。

なお、走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて破壊起点部の詳細な観察を行い、き裂発生条件等を検討した。

2・3 静的片持曲げ試験方法

疲労試験片そのものを 3 本準備し、オルゼン型万能試験機を用いて、固定台に片端を支持された試験片に対して曲げ荷重を負荷する方式で曲げ試験を実施した。

Table.1 Chemical composition of tested material(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

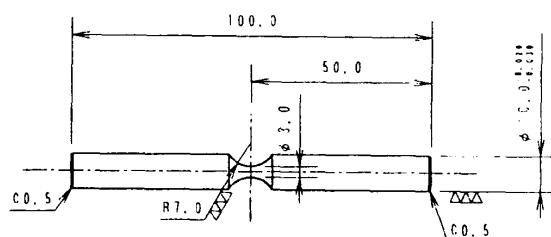


Fig.1 Shape and dimensions of specimen tested

3. 実験結果および考察

実験により得られた $S-N$ 曲線を Fig.2 に示す。本材料では、 $10^4\sim 10^5$ 回付近の繰返し数領域において一段目の折れ曲りが現れた後、 10^7 回の繰返し数を越える寿命域において二段目の折れ曲りを生じた。一段目の折れ曲りにおける水平部の応力 σ_w を 10^7 回に対する疲労限度として、ステアケース法によってこの値を求めた結果、 $\sigma_w=1313\text{MPa}$ であった。Fig.2 における $S-N$ 曲線では、破断後の破面観察により疲労き裂の発生起点は 2 種類のタイプに大別された。すなわち、Fig.3 に示すような試験片表面でのすべりに起因するもの(○印)、ならびに Fig.4 に示すような試験片内部の介在物等の欠陥による Fish-eye 破壊(●印)である。Fig.2 より、一段目の折れ曲りまでの破壊は、試験片表面でのすべりに起因するものであり、 $S-N$ 曲線の二段折れ曲り部以降における破壊は主に Fish-eye 破壊であることがわかった。

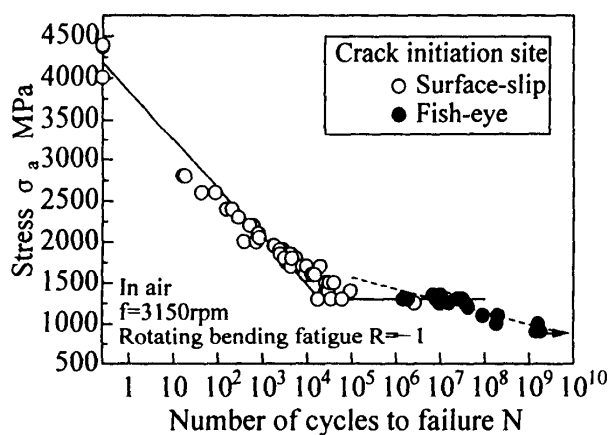


Fig.2 S-N curve of bearing steel, SUJ2

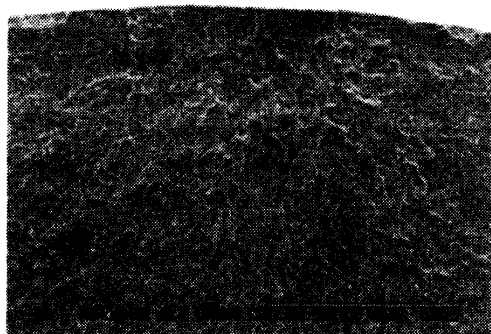
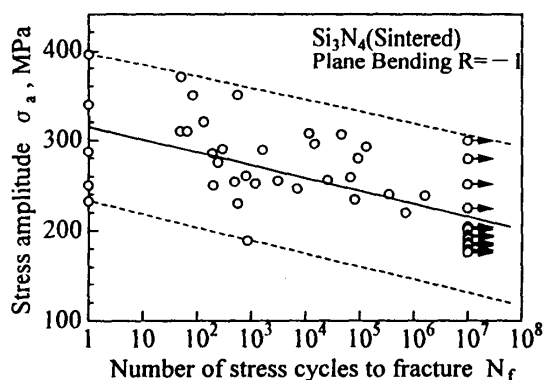
Fig.3 An example of SEM observation for surface-slip type ($\sigma_a=2200\text{MPa}$, $N_f=511$)Fig.4 An example of SEM observation for Fish-eye type ($\sigma_a=1300\text{MPa}$, $N_f=2.66 \times 10^7$)

Fig.5 S-N diagram for silicon nitride specimens in plane bending

次に、低サイクル域を対象として応力 $\sigma_a=1800\text{MPa}$ 以上の高応力域で得た実験結果に着目すると、 10^4 回以上のサイクル域を対象とした疲労試験から得られているS-N曲線をさらに高応力部分へ延長した直線上に現れていた。なお、Fig.2の縦軸上の実験点は静的曲げ試験結果を $N=1/4$ サイクルのデータとしてプロットしたもので、表面起点型破壊データ(○印)の回帰直線の延長上にほぼ合致している。通常の金属材料はこのように直線的に外挿されることはなく、疲労寿命の低サイクル側への推移に伴って、時間強度が飽和して逆S字形を呈する傾向が見られる。本実験で得られた結果は、本研究で用いた高強度鋼特有の疲労特性と判断される。このような低サイクル域での疲労特性はFig.5に示すようなセラミックス材料の疲労特性⁴⁾に近く、高炭素クロム軸受鋼(SUJ2)は低サイクル域でも極めて高い時間強度を有しており、応力繰返し数の少ない過大負荷条件における構造用材料としての有用性が期待される。

このような、幅広い寿命域における疲労試験を同一条件で実施した例は世界的に見て前例がなく、この疲労試験結果そのものが本研究における一つの貴重な成果と考えられる。

4. 結言

高強度鋼の広寿命域における疲労特性を明確にする研究の一環として、高炭素クロム軸受鋼SUJ2を用いて広領域にわたる片持回転曲げ疲労試験を大気中で行った。得られた主な結論は以下の通りである。

(1)本供試材の疲労破壊は短寿命域においては表面に位置する結晶のすべりに起因する表面起点型破壊が現れ、長寿命域においては内部の介在物を起点とする内部起点型破壊が現れた。

(2)繰返し数1000回以下の極低サイクル寿命域(静的曲げ試験を含む)から繰返し数 2×10^9 回までの広範囲にわたる疲労特性が明らかになった。

(3)本供試材は短寿命域において極めて高い時間強度を有し、荷重荷回数が少ない高負荷部材の構造材料として特に有用であることがわかった。

参考文献

- 1) 城野政弘, 日本機械学会講演論文集, No96-1, 414 (1996).
- 2) 日本機械学会編, 日本機械学会研究協力部会 RC130 高サイクル疲労に関する調査研究分科会 成果報告書(1994).
- 3) 酒井達雄, 武田光弘, 塩澤和章, 越智保雄, 中島正貴, 中村 孝, 小熊規泰, 日本材料学会 第24回疲労シンポジウム講演論文集, p.61 (1998).
- 4) T. Sakai and T. Hoshide, Cyclic Fatigue in ceramics, p.189, (1995), Elsevier& JSMS.