

630 高炭素クロム軸受鋼の長寿命疲労特性に対する内部欠陥の影響

Effect of Interior Defects on Long-Life-Fatigue Property for High Carbon Chromium Bearing Steel.

正 酒井 達雄 (立命大) , ○正 武田 光弘 (立命大) , 正 中島 正貴 (豊田高専)

正 塩澤 和章 (富山大) , 正 越智 保雄 (電通大) , 正 黒島 義人 (九工大)

Tatsuo SAKAI, Ritsumeikan Univ., Mitsuhiro TAKEDA, Ritsumeikan Univ.,
Masaki NAKAJIMA, Toyota College of Technology, Kazuaki SHIOZAWA, Toyama Univ.,
Yasuo OCHI, Univ. of Electro Communications, Yoshihito KUROSHIMA, Kyushuu Institute of Technology

In order to clarify the fatigue behavior in long life region together with fracture surface characteristics, gigacycle fatigue tests were performed by means of same type of many testing machines and same type of specimens of high strength steel, SUJ2. As a result of this study, we found that the complicated *S-N* property of high strength steel, SUJ2, was successfully explained as duplex *S-N* characteristics corresponding to the respective two different fracture modes of surface slip governed fracture and inclusion governed fish-eye fracture. In this report, relationships between interior defect and fatigue life were especially discussed from a viewpoint of the fracture mechanics.

Key Words: Fatigue, Long Life Fatigue, Surface Slip, Fish-eye, Interior Defect, High Strength Steel, SUJ2

1. 緒言

近年、機械・構造物の高齢化に伴い、 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り現象が報告されており、その破壊機構に大きな関心が集まっている。

そこで、本研究では、材料強度確率モデル研究会の共同研究の一環として、高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 の砂時計型試験片を多数準備し、同一タイプの試験機を多数設置して 1×10^9 回程度までを対象とした疲労試験を実施し、長寿命疲労特性を解析するとともに、破面観察を行って疲労破壊機構についても考察を加えた。その結果、表面起点型破壊と内部起点型破壊に大別され、各破壊形態に対応する *S-N* 曲線が重なって現れる二重 *S-N* 特性を明らかにした。本報では特に内部起点型破壊を引き起こす内部欠陥と疲労寿命との関係に着目した解析結果について報告する。

2. 供試材および実験方法

本研究に用いた材料は高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 である。その化学成分を Table.1 に示す。試験片は Fig.1 に示す形状の最小断面直径 3mm の砂時計型試験片であり、応力集中係数 $\alpha=1.06$ である。試験片は $\phi 14.3\text{mm}$ の丸棒より切出し、仕上げ寸法より 0.1mm 大きめに旋削した後、真空炉中で 1108K-2.4ks 保持後油冷(353K)の焼入れ、453K-7.2ks 保持後空冷の焼戻しを行った。その後円筒研削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から内部までほぼ均一であり、 $H_v=750\sim 795$ の範囲内であった。

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を用い、室温・大気中の実験室環境下で繰返し速度 3150rpm で実施した。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試験を実施し、 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、 $\sigma_a=1800\text{MPa}$ 以上、 $\sigma_a=1300\text{MPa}$ および $\sigma_a=1250\text{MPa}$ で複数本の疲労試験を行うとともに、上記のステアケース法で推定された疲労限度以下の応力レベルで実験を行った。本実験で破断した試験片については走査型電子顕微鏡(SEM)を用いて破壊起点部の詳細な観察を行い、き裂発生条件の考察および破面の定量的測定を実施した。

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

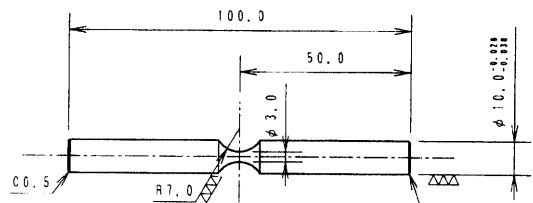


Fig.1 Shape and dimensions of specimen tested

3. 実験結果および考察

3・1 *S-N* 曲線

疲労試験で得られた *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。また、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, Fig.5 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。

3・2 Fish-eye 破壊の様相

S-N 曲線の二段折れ曲りに伴って認められた Fish-eye 破壊に着目して Fig.4, Fig.5 に示す観察結果の一例を参照すると、内部き裂発起点の介在物の周囲には Fig.4 に示すように円形状の部分(Fish-eye)が観察され、その外側の部分とは異なった破面様相を呈する。そして、本研究ではすべての Fish-eye が試験片表面に接していた。この中心部を拡大すると、Fig.5 のように介在物の周囲に粒状を示す破面領域が観察され、その外周部とは異なった破面様相を呈する。この領域は村上らの指摘する「黒い部分」と呼ぶものと同じであり、ここでは「粒状領域」と呼ぶことにする。この粒状領域形成の機構は現時点で不明であるが、介在物を起点として発生したき裂の初期進展過程として形成されるものと推察される。

3・3 き裂発起点近傍の定量的評価

内部き裂発生型疲労破壊を示した試験片の破面には Fig.5 に示したような介在物が存在し、明瞭な Fish-eye が観察された。破面観察を基に、Fig.6 に模式的に示した Fish-eye 各部の寸法を SEM 観察写真から測定して定量的評価を行った。Fig.7 は試験片表面から介在物中心までの距離 d_{inc} と破断繰返し数 N_f との関係である。 d_{inc} は 19~239 μm の広い範囲で大きくばらついており、 N_f との強い相関性は認められない。次に、Fish-eye の試験片半径方向長さ $2b$ と d_{inc} の比である $d_{inc}/2b$ と N_f の関係を Fig.8 に示す。Fig.8 より、 $d_{inc}/2b$ の平均は 0.6 程度であり、介在物の位置は Fish-eye の中心よりやや深い位置に存在する。これらの値は破断繰返し数 N_f に対してほぼ一定値を示し、疲労寿命に対する依存性はない。Fig.9 は疲労き裂発起点各部の寸法 $\sqrt{\text{area}}$ と破断繰返し数 N_f の関係である。なお、疲労き裂発起点各部の寸法 $\sqrt{\text{area}}$ については、村上らの研究に基づき、介在物、粒状領域、Fish-eye の寸法より面積を計算し、その平方根をそれぞれ $\sqrt{\text{area}_{inc}}$ 、 $\sqrt{\text{area}_{gr}}$ 、 $\sqrt{\text{area}_{fish-eye}}$ とした。 $\sqrt{\text{area}_{inc}}$ は疲労寿命に対してほぼ一定の値をとっており、疲労寿命に対する依存性はない。一方、 $\sqrt{\text{area}_{gr}}$ については変化の程度は小さいが、疲労寿命の増加に伴い増大する傾向にある。介在物周辺の粒状領域は必ず現れるわけではなく、Fig.9 でわかるように、比較的寿命の短い場合に現れないことが示唆される。 $\sqrt{\text{area}_{fish-eye}}$ と破断繰返し数 N_f の関係は大きくばらついており、疲労寿命に対する依存性は認められない。

<結言、文献：省略>

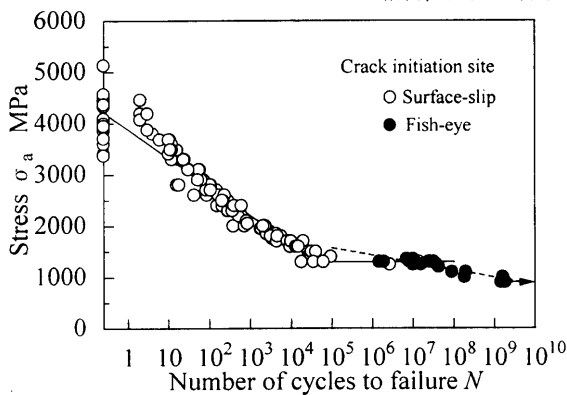


Fig.2 S-N curve of bearing steel, SUJ2

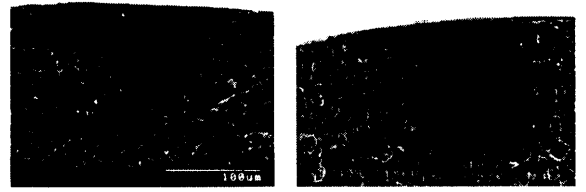


Fig.3 Slip type fracture(x400) Fig.4 Fish-eye fracture(x400)

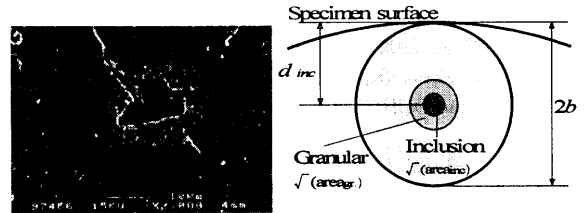


Fig.5 Inclusion (x2000) Fig.6 Size and dimensions for fish-eye

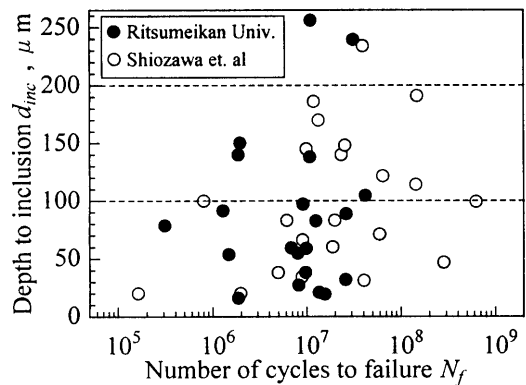


Fig.7 Correlation between depth of inclusion and N_f

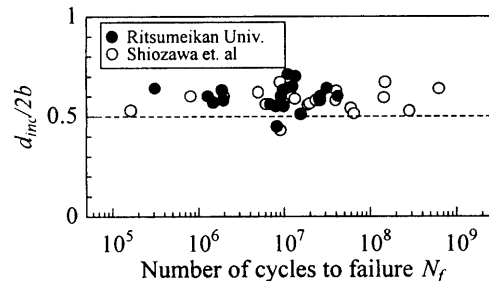


Fig.8 Correlation between $d_{inc}/2b$ and N_f

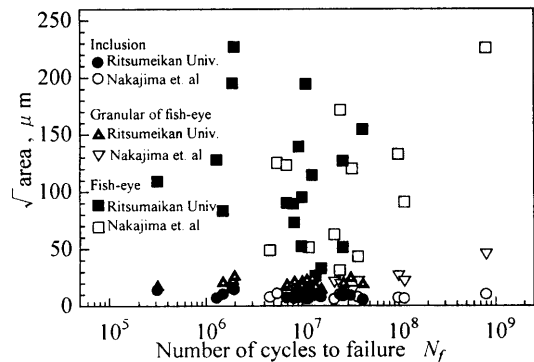


Fig.9 Correlation between Size, dimensions of fish-eye and N_f