

豊田高専

○中島正貴

岐阜大工

戸梶恵郎

中日本自動車短大

井藤賀久岳,

高 行男

豊田高専

清水利弘

1 緒 言

高強度鋼では $S-N$ 曲線に特徴的な二段折れ曲がり現象が現れ、従来の疲労限度以下の応力において fish-eye を伴う内部き裂の発生、進展によって破壊を生じる。この内部破壊の機構については不明な点が多く、内部き裂の発生時期に関しても直接観察することが不可能であるため、これまで明瞭ではなかった。そうした中で黒島らは、内部き裂を発生させたと考えられる試験片について断面の電子顕微鏡観察を行い、内部き裂が疲労寿命のきわめて初期に発生し、その後停留する傾向を示すことを明らかにしている。しかし、試験を中断して観察を行っているため、そのき裂が最終破壊を導くものであるか否かといった点で疑問がないわけではなかった。

本研究では、fish-eye 形成の初期段階に見られる非金属介在物を取りまく粒状の領域に注目して、それが現れる応力域と現れない応力域があることから、それらの応力域の間で（低→高）二段二重変動応力疲労試験を行い、fish-eye の形成時期の推定を試みた。

2 供試材および試験方法

2.1 供試材 供試材は高炭素クロム軸受鋼 (JIS SUJ2) で、その化学成分 (mass %) は 1.01C, 0.23Si, 0.36Mn, 0.012P, 0.007S, 0.06Cu, 0.04Ni, 1.45Cr, 0.002Mo, Bal.Fe である。材料には 1108K より油焼入れ後、453K で焼戻し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 $\phi=0.4\%$ である。この材料を最小断面部直径 3mm の砂時計型試験片に機械加工し、さらにスチール系ビーズおよびセラミックス硬質ビーズをそれぞれ初段および2段目に用いたショットピーニングを試験部に施した。以後、ショットピーニングを施した試験片を SP 材、施さなかった試験片を母材と呼ぶ。

2.2 試験方法 本研究では内部き裂の発生時期を推定するために、室温大気中において4連式片持ち回転曲げ疲労試験機（繰返し速度 $f=3150\text{rpm}$ ）を用いて、SP 材について Fig.1 に示すような（低→高）二段二重変動応力疲労試験を行った。試験は fish-eye 形成の初期段階に見られる非金属介在物を取りまく粒状の領域に注目して、内部破壊においてそれが認められる応力域（低応力・長寿命域）と認められない応力域（高応力・短寿命域）があることから、それらの応力域の間で変動応力疲労試験を行った。具体的には破面に粒状の領域が現れる低応力 ($\sigma_L=1100\text{MPa}$) において任意の繰返し数比 (n_i/N_f) に相当する繰返しを与え、その後高

応力 ($\sigma_H=1600\text{MPa}$) において破断まで実験を行った。破断後の破面に粒状の領域が認められれば、それは低応力での繰返しの間に形成されたものと考えられるので、そのときの繰返し数比を内部き裂の発生時期と見なした。

3 実験結果および考察

3.1 $S-N$ 特性 一定応力振幅下における母材および SP 材の $S-N$ 曲線を Fig.2 に示す。図より母材には特徴的な二段折れ曲がり現象が認められ、1400MPa 以上の高応力域では表面起点型破壊を、1100MPa 以下の低応力域では多くの場合内部起点型破壊を生じた。これらの間の応力域では二つの破壊様式が混在しており、短寿命側では表面起点型破壊が、長寿命側では内部起点

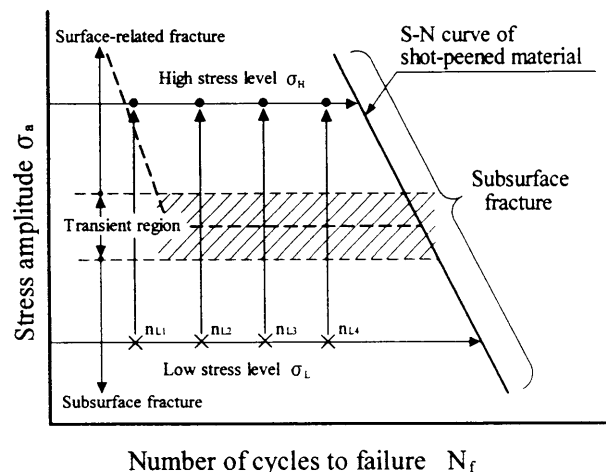


Fig.1. Schematic illustration of two-step variable loading tests.

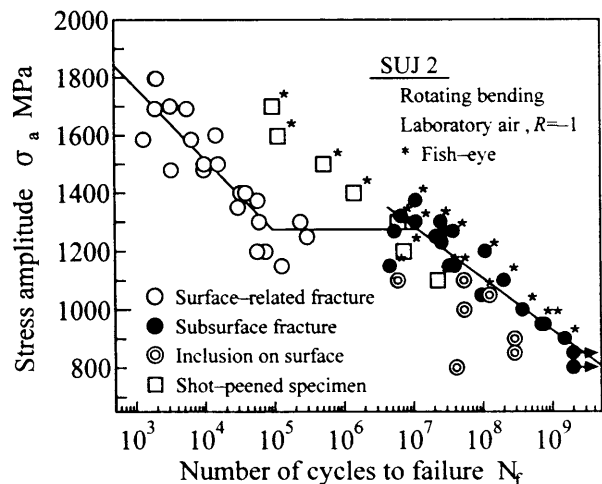


Fig.2. $S-N$ diagram.

型破壊が認められた。10⁷回の繰返しを基準としたステアケース法（応力階差 50MPa）による疲労限度の決定では $\sigma_w = 1275\text{MPa}$ が得られた。一方 SP 材の S-N 曲線では、試験された応力域において二段折れ曲がり現象は認められなかった。また、この範囲内における破壊はすべて fish-eye を伴う内部起点型であった。すなわち、母材では表面起点型破壊が認められた応力域においても、SP 材では内部起点型破壊を生じ、疲労寿命はより長寿命側に位置した。

3.2 変動応力試験結果 上記の結果より、SP 材の fish-eye 内部の非金属介在物を取りまく粒状の領域に注目すると、粒状領域は 1400MPa 以下の応力域で認められ、1500MPa 以上では現れなかった。この観察から変動応力試験を行う応力として、粒状領域のある低応力 $\sigma_L = 1100\text{MPa}$ とその存在しない高応力 $\sigma = 1600\text{MPa}$ を選択した。一定応力振幅下の 1600MPa において破壊起点となった非金属介在物およびその周辺の SEM 写真を Fig.3 に示す。図から明らかなように、非金属介在物を取りまく粒状の領域は認められない。低応力側における繰返し数を $n_L = 1 \times 10^7$, 1.5×10^7 , 2×10^7 および 2.5×10^7 回と設定した。これらは 1100MPa の一定振幅下における疲労寿命 ($N_L = 2.71 \times 10^7$ 回) のそれぞれ約 37~92% に相当する。

低応力での繰返しの後、高応力 1600MPa へ負荷を変動させた。破断後の破面観察よりすべての試験片において fish-eye および介在物周辺に粒状の領域が確認された。低応力における繰返し数が最も少ない $n_L = 1 \times 10^7$ ($n_L/N_L = 0.37$) の場合の破面を Fig.4 に示す。粒状の領域が認められることから、内部き裂の発生が低応力における疲労寿命の約 37%程度ですでに起きていることが明らかとなった。黒島らは応力にも依存するが、10⁴ 回以下の繰返し数において内部き裂が発生することを指摘している。また、塩澤らも本研究と同様の二段二重変動応力試験によって、粒状領域が低応力側の繰返し数 10⁶ 回 ($n_L/N_L = 0.05$) 付近で現れることを報告している。これらの結果より、内部き裂は疲労寿命のきわめて初期に発生すると考えられる。

また、 $\sqrt{area}$ パラメータモデルを用いて評価した粒状領域の応力拡大係数 ΔK は、累積繰返し数比 $n_L/N_L = 0.37 \sim 0.92$ の間で $\Delta K = 3.1 \sim 3.9\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ となり、その大きさは寿命の全範囲を通じてほとんど変化しない。しかしながら、一定振幅下の 1100MPa で破壊した試験片における粒状領域の応力拡大係数は $5.3\text{MPa}\sqrt{\text{mm}}$ であった。

このことは粒状領域から内部き裂への遷移が、寿命の 90%を越える寿命域で生じていることを示唆している。

3.3 Miner 則による評価 上述の二段二重疲労試験結果に対して Miner 則を適用し、累積損傷を評価した。その結果を Table 1 に示す。低応力側における繰返し数が最も少なかった $n_L = 1 \times 10^7$ の場合を除いて、累積繰返し数比はいずれも 1 前後となり、Miner 則が成立することがわかる。 $n_L = 1 \times 10^7$ の場合の累積繰返し数比が小さくなった原因は明確でないが、いずれの場合も破壊機構が高、低応力とも同じであることが、Miner 則が成立する理由であると考えられる。すなわち、高、低応力における破壊機構はともに内部起点型破壊であり、さらに低応力で生じた破壊起点が高応力側でも引き継がれ、同じ介在物から破壊を生じたと推定されることから、このような結果が得られたものと考えられる。

（結言および参考文献は省略）

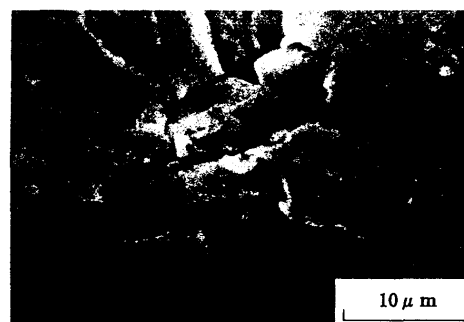


Fig.3. Inclusion and surroundings in fish-eye observed at constant stress amplitude of $\sigma = 1600\text{MPa}$.

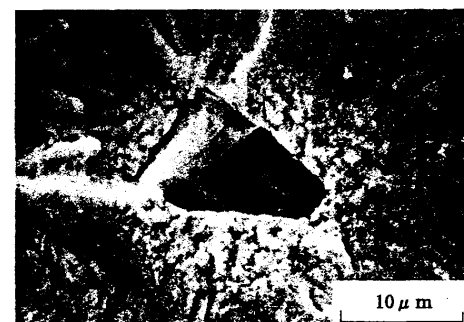


Fig.4. Inclusion and granular area formed under two-step variable loading ($\sigma_H = 1600\text{MPa}$, $\sigma_L = 1100\text{MPa}$, $n_L = 1 \times 10^7$).

Table 1 Cumulative damages under two-step variable amplitude loadings (Lo→Hi).

σ_L (MPa)	n_L	N_L	σ_H (MPa)	n_H	N_H	n_L/N_L	n_H/N_H	$\Sigma (n/N)$
1100	1.00×10^7	2.71×10^7	1600	2.09×10^4	1.79×10^5	0.37	0.12	0.49
	1.50×10^7			1.04×10^5		0.55	0.58	1.13
	2.00×10^7			3.47×10^4		0.74	0.19	0.93
	2.50×10^7			1.07×10^4		0.92	0.06	0.98