

高炭素クロム軸受鋼の長寿命軸荷重疲労特性の
応力比依存性に関する研究

立命館大学

酒井達雄

立命館大学[院] ○佐藤陽介

立命館大学[院]

長野能之

東レ(株)

武田光弘

1 緒 言

鉄鋼材料の $S-N$ 曲線は、一般に繰返し数 $10^5 \sim 10^6$ 回程度の寿命域で水平に折れ曲がり明瞭な疲労限度を示すことが知られており、機械構造物の疲労設計において、この疲労限度を基準とした耐久設計が広く用いられている。しかし、高強度鋼などに関して、繰返し数 10^7 回以上の超長寿命域において $S-N$ 曲線が再び下降するという実験結果がしばしば報告されている。この事実は、これらの材料を用いた機械構造物の耐久設計において、従来の疲労限度は本来の疲労限度を与えないことを示唆しており、長期信頼性保証の観点から金属材料の長寿命域における疲労特性解明が大きな課題となっている。

以上の観点から、油圧サーボ型疲労試験機を用いて高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 について 3 種類の応力比 ($R=-1, 0, 0.5$) により軸荷重疲労試験をそれぞれ実施し、本材料の応力比効果を考慮した軸荷重疲労試験における $S-N$ 特性を明らかにした。

また、本材料は既に $R=-1$ の軸荷重疲労試験において表面起点型破断に対する $S-N$ 曲線と、内部起点型破断に対する $S-N$ 曲線が別の場所にずれて現れる二重 $S-N$ 特性が認められているが、本研究ではこの二つの破断形態のうちとくに内部起点型破断に注目し、Fish-eye 破面にみられる細粒状領域 (FGA) の内部起点型破断との関連を解明するため、FGA の形成にあたる応力比効果について破壊力学的観点から考察を加えた。

2 供試材および実験方法

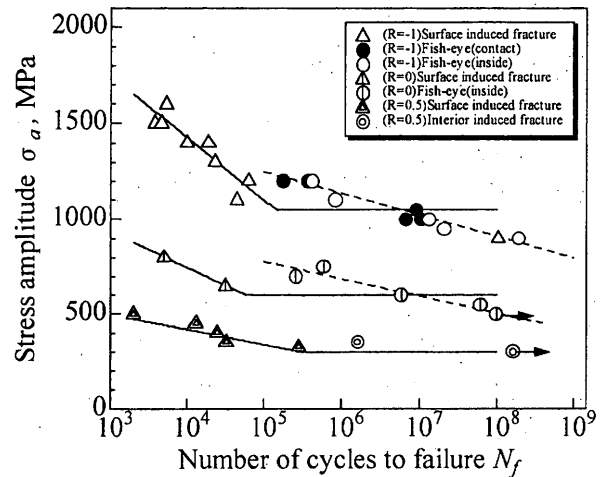
本研究で用いた材料は高炭素クロム軸受鋼 (SUJ2) であり、その化学組成を Table I に示す。また、実験に用いた試験片の応力集中係数は $\alpha=1.04$ である。次に、本研究で使用した疲労試験機は、容量 20kN の油圧サーボ型疲労試験機であり、室温・大気中で疲労試験を実施した。なお、試験速度は 3000rpm (50Hz) とし、応力比 $R=-1, 0$ および 0.5 の 3 種類について軸荷重疲労試験を行った。また、すべての試験片破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) で詳細に観察し、き裂発生起点を確認するとともに破面の特徴を調べた。

Table I Chemical composition of 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

3 実験結果および考察

3.1 $S-N$ 特性 Fig. 1 は、前節に示した条件で実施した軸荷重疲労試験で得られた $S-N$ 曲線である。ここで、図中の三角印および丸印は、それぞれ表面起点型および内部起点型の疲労破断を示している。図より、本材料の軸荷重における $S-N$ 特性は $R=-1$ および $R=0$ において表面起点型破断に対する $S-N$ 曲線 (実線) と、内部起点型破断に対する $S-N$ 曲線 (破線) が別の場所にずれて現れる二重 $S-N$ 曲線が確認された。 $R=0.5$ にお

Fig. 1 $S-N$ diagram under axial loading.

いても同様の傾向にあると推測されるが、サンプル数が 2 点と少ないためプロットのみにとどめた。

3.2 破面観察結果 本実験で破断した試験片の破面をすべて走査型電子顕微鏡 (SEM) で観察し、疲労き裂の発生起点に基づいて、表面起点型破断と内部起点型破断の区別を確認した。ここで、内部起点型破断の一例として、応力比 $R=0$ 、応力振幅 $\sigma_a=600$ MPa、破断繰返し数 $N_f=5.98 \times 10^6$ の Fish-eye が破面の内奥部にあって表面に接していない疲労破面観察写真を Fig. 2 に示す。写真中に 2 本の点線で示したように、破面が 3 つの特徴的な領域に分割できることがわかる。第 1 の領域はき裂発生起点周縁の比較的平坦で滑らかな領域であり、これを取り囲むように凹凸が顕著で方向性の不明確な第 2 の領域が存在する。さらに、この領域の前縁から放射状の条痕を伴う第 3 の最も広い領域が形成されている。すべての疲労破面を観察した結果、この 3 つの領域は応力比や破断形態によらず、いずれの破面においても同様の傾向が認められた。さらに、第 1 の領域については、破断形態によらず応力比が大きくなるとともに領域が縮小し、かつ不鮮明になっており、平均応力がき裂進展挙動に何らかの影響を及ぼしていることが確認された。

また、Fig. 3 は Fig. 2 のき裂発生起点となった介在物周縁の拡大写真である。図中の点線で示した介在物周縁の限られた領域で極めて特徴的な『細粒状領域 (Fine Granular Area: FGA)』とよばれる破面が形成されている。

3.3 破壊力学的考察 前節の 3 つの領域は、本軸受鋼の CT 試験片により得られた応力拡大係数範囲とき裂進展速度の関係において、き裂前縁の応力拡大係数がき裂進展則に沿って安定成長する第 II₀ 段階、き裂進展挙動が第 II₀ 段階から外れて加速領域となる第 II_c 段階、さらに破壊靱性値 K_{Ic} に達して

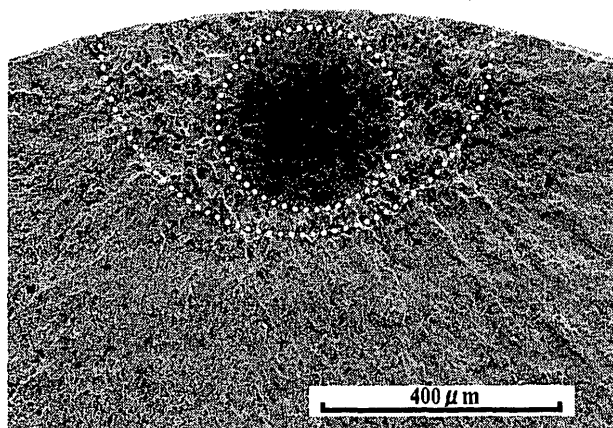


Fig. 2 Fracture surface with inside fish-eye.
($R=0$ $\sigma_a=550\text{MPa}$ $N_f=6.22\times 10^7$)

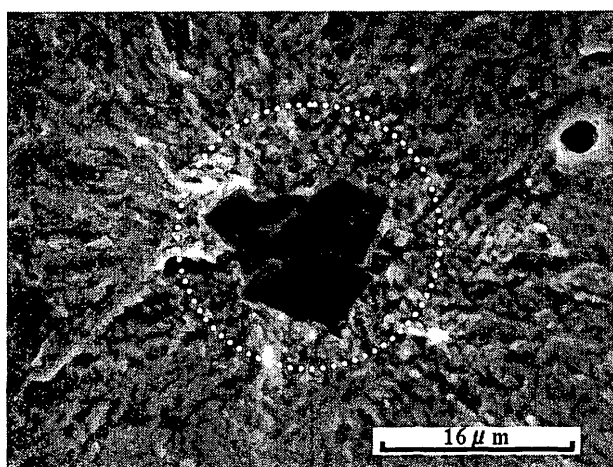


Fig. 3 Fracture origin on the surface in Fig. 3.2.

不安定瞬時破壊を生ずる最終段階にそれぞれ対応していることが報告されている。そこで、本研究では平均応力が与えるき裂進展挙動への影響を確認するため、3種類の応力比 $R=-1$, 0 , 0.5 について第Ⅱ₀段階から第Ⅱ₀段階へ遷移するき裂前縁の応力拡大係数 ΔK_r 、および不安定瞬時破壊を生ずる遷移領域前縁の応力拡大係数 ΔK_{fc} を式(1)・(2)から算出し、その平均値を Table II に示した。ここで、 $R \geq 0$ となる圧縮応力の負荷されない試験においては、応力値を応力振幅ではなく最大応力 σ_{max} と最小応力 σ_{min} の差 $\Delta \sigma$ を使用し、それぞれの値を算出した。

円柱内部に円形き裂を有する場合：

$$K = \left[F_p P + F_M \frac{4Ma}{(R^2 + a^2)} \right] \frac{\sqrt{c/R}}{\pi(R^2 - a^2)} \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

円柱の表面に半円状き裂を有する場合：

$$K = \sigma \sqrt{\pi b} \cdot F_l \quad (2)$$

なお、前述の CT 試験片による応力拡大係数範囲とき裂進展速度の関係から得られた ΔK_r 、 ΔK_{fc} 値は、それぞれ $14.0\text{MPa}\sqrt{m}$ および $19.8\text{MPa}\sqrt{m}$ であった。これらの値を比較すると、 $R=-1$ および $R=0$ においては、各値が CT 試験から得られた値とほぼ一致していることがわかる。しかし、 $R=0.5$

Table II Stress intensity factor range ΔK_r and ΔK_{fc} .

STRESS RATIO	AVERAGE VALUE	
	ΔK_r (MPa)	ΔK_{fc} (MPa)
$R=-1$	14.0	22.5
$R=0$	14.4	23.9
$R=0.5$	8.7	16.0

においては、 ΔK_r 、 ΔK_{fc} ともに値が大きく減少している。この結果から平均応力を与えることにより、き裂の進展挙動が第Ⅱ₀段階から第Ⅱ₀段階へ遷移する前縁、および不安定瞬時破壊を生ずる遷移領域前縁のき裂進展速度が急激に増したことが予想することができる。このことは前節で述べた疲労破面観察の結果から裏付けられる。実験結果より、応力振幅および平均応力がともに高く、寿命の短い疲労破面のほうが ΔK_r 、 ΔK_{fc} ともさらに小さくなる傾向が確認されており、平均応力がき裂進展速度に影響を与えているといえる。

次に、 $R=-1$, 0.5 において観察された FGA について、き裂前縁の応力拡大係数範囲 ΔK_{FGA} を式(3)より算出した。各応力比の ΔK_{FGA} の平均値は、 $R=-1$ における ΔK_{FGA} の平均値が $4.74\text{MPa}\sqrt{m}$ に対し、 $R=0.5$ において観察された FGA の ΔK_{FGA} は $4.19\text{MPa}\sqrt{m}$ と低下した。さらに、 $R=0.5$ の疲労破面において FGA が確認されない破面が観察されたため、介在物の大きさを仮に area_{FGA} として ΔK_{FGA} を算出した結果、 $4.07\text{MPa}\sqrt{m}$ の値が得られた。この値は、前述の $R=0.5$ における ΔK_{FGA} とほぼ同レベルであり、それぞれの応力値を考慮すると、この値はほぼ適切であることがわかる。このことは、応力比が大きくなるにつれて FGA は現れにくくなることを示唆している。

$$\Delta K_{FGA} = 0.5\sigma \sqrt{\pi \sqrt{\text{area}_{\text{FGA}}}} \quad (3)$$

4 結言

本研究で得られた主な結論を以下に要約する。

- 1) SUJ2 について引張圧縮軸荷重下で長寿命域疲労試験を行った結果、表面起点型破断と内部起点型破断の各破断形態の $S-N$ 曲線が別々の場所に現れる二重 $S-N$ 特性が確認された。
- 2) 内部起点型破断の破面には明瞭な Fish-eye が形成され、その中央部付近にはすべてき裂発生源となった介在物が観察された。また、多くの破面では細粒状領域(Fine Granular Area : FGA)が確認されたが、平均応力が増加するにつれて FGA が現れにくくなることがわかった。
- 3) 破面観察結果をもとに破壊力学的観点から Fish-eye 前縁の ΔK_r 、不安定瞬時破壊時の ΔK_{fc} を算出し、CT 試験片で得られた疲労き裂進展則の当該レベルと比較した結果、応力比 $R=-1$, $R=0$ においてはほぼ対応するが、 $R=0.5$ の ΔK_r 、 ΔK_{fc} 値はそれぞれ小さくなり、Fish-eye 前縁と不安定瞬時破壊時のき裂進展速度が高くなっていることがわかった。
- 4) FGA 前縁の ΔK_{FGA} については材料特性にもよるが、応力比が高くなるにつれて低下することが確認された。このことは介在物のサイズ以下の領域で ΔK_{th} をとる可能性を意味し、破面観察結果からも FGA の存在しない内部起点型破面の存在が確認された。

参考文献 <略>