

313 高強度鋼の長寿命疲労強度特性に及ぼす応力比の影響

Effect of Stress Ratio on Long-Life Fatigue Behavior in High Strength Steels

塩澤和章 (富山大),
長谷川貴之 (富山大院),○西野精一 (富山大),
谷内康之 (富山大院)Kazuaki SHIOZAWA, Seiichi NISHINO, Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555
Takayuki HASEGAWA, Yasuyuki YACHI, Graduate Student of Toyama University, 3190 Gofuku, Toyama 930-8555**Key Words:** Fatigue, Subsurface Crack, Stress Ratio, Axial Loading, High-Speed Steel, High Carbon Chromium bearing Steel

1. 緒言

近年, 10^7 回を超える超長寿命域における疲労強度特性の把握が各種機器・構造物の安全性や経済性の面から重要とされ多くの研究が行われている。これまで長寿命域における疲労試験の多くは回転曲げ荷重下で実施されており, 軸荷重条件下での研究は十分には行われていない。また, 長寿命域で生じる内部き裂発生型破壊で重要な役割をはたすことが報告されているき裂発生起点となった介在物周囲に形成される凹凸の大きい粒状領域(GBF, Granular-Bright-Facet)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。

本研究では高速度工具鋼 SKH51 及び高炭素クロム軸受鋼 SUJ2 を用いて軸荷重条件下での長寿命域の疲労試験を行い, 内部き裂発生型疲労破壊に及ぼす負荷応力比の影響を明らかにすることを目的とした。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材 本研究で用いた供試材は高速度工具鋼 JIS SKH51 と高炭素クロム軸受鋼 JIS SUJ2 であり, 化学組成 (mass%) はそれぞれ 0.88C, 5.0Mo, 6.0W, 2.0V 及び 1.01C, 0.23Si, 0.36Mn, 0.012P, 0.007S, 1.45Cr, 0.06Cu, 0.04Ni, 0.02Mo である。SKH51 には焼入れ(1453K 油冷および 823K 油冷を 2 回)の後, 823K 空冷の焼戻しの熱処理を施し, SUJ2 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。いずれの供試材もピ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, その値は SKH51 で 817HV, SUJ2 で 749HV であった。試験片は最小断面直径 3mm の砂時計型試験片であり, 試験片標点部表面を #2000 までのエメリー紙とパフにより研磨後, 疲労試験に供した。

2.2 疲労試験方法 疲労試験は室温・大気中の実験室雰囲気の下, 軸荷重条件下で行った。SKH51 の場合, 試験には電気・油圧サーボ式疲労試験機を用い, 繰返し速度 50Hz で, 応力比 $R(=\sigma_{\min}/\sigma_{\max})$ は -1.3, -1, 0, 0.3 および 0.5 の 5 条件とした。SUJ2 の場合, 多連式軸荷重疲労試験機を用い, 繰返し速度 80Hz で $R=-1, 0, 0.5$ の 3 条件とした。

3. 実験結果および考察

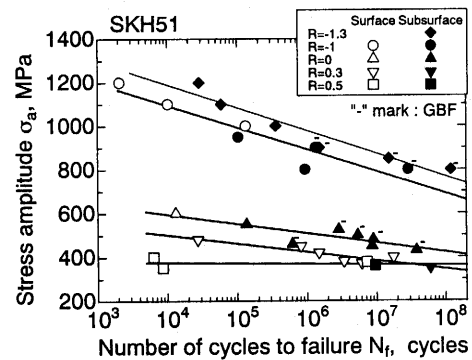
3.1 S-N 曲線 疲労試験により得られた S-N 曲線を図 1 に示す。図中の白色のプロットは表面き裂発生型破壊, 黒色のプロットは内部き裂発生型破壊の結果を示している。また "-" のマークを付けた実験点は, 破面観察により内部き裂発生起点となった介在物周囲に凹凸の大きな領域(GBF)が観察されたものである。図より, 各供試材ともいずれの応力比条件でも内部き裂発生型破壊を生じており, 表面き裂発生型破壊から内部き裂発生型破壊への遷移は応力比が低いほど短寿命域で生じることがわかる。GBF 領域は SKH51 では $R=-1.3, R=-1$ および $R=0$ の破面で観察され, SUJ2 では $R=-1, R=0$ および $R=0.5$ の破面で観察された。また, GBF 領域が観察された試験片の破断寿命は, 供試材によらず 10^6 回以上であった。

3.2 破面観察結果 破面観察の結果, 疲労破壊形態はいずれの供試材も表面き裂発生型と内部き裂発生型の 2 種類に分類された。表面き裂発生型破壊における疲労き裂は, SUJ2 の $R=-1$ の結果以外はいずれの応力比においても試験片表面

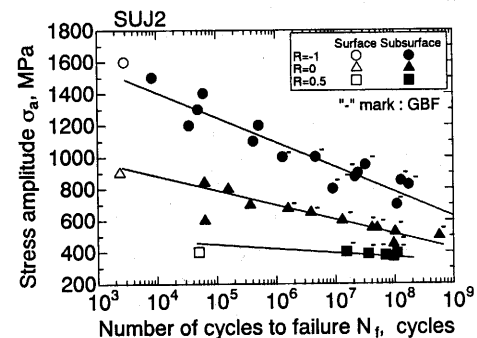
の介在物を起点に発生し, 試験片内部に向かって放射状に進展していた。内部き裂発生型疲労破壊における疲労き裂の発生は, 試験片内部の介在物を起点としており, き裂がほぼ同心円状に進展しフィッシュ・アイを形成していた。なお, SKH51 の $R=-1.3$ の破面には黒くつぶれた箇所や, こすれた跡のような筋が認められた。

図 2 に SKH51 の $R=-1.3, R=-1$ および $R=0$ の内部き裂発生型破壊のき裂発生起点となった介在物近傍の SEM 写真を示す。いずれの応力比においてもき裂発生起点となった介在物周囲には凹凸の大きな領域 GBF が観察された。また, $R=0$ の GBF に比べ $R=-1.3, R=-1$ の GBF は凹凸が微細ではっきりしており, 応力比によって GBF の様相が異なることがわかる。なお, SUJ2 の破面にも同様の傾向が認められた。

3.3 き裂発生起点の破壊力学的検討 き裂発生起点の介在物寸法と GBF 寸法を用いて村上らによる次式を用いて応力

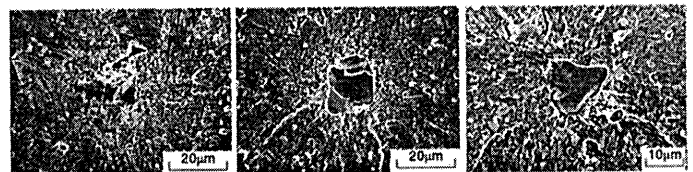


(a) SKH51



(b) SUJ2

Fig.1 S-N curves.



(a) $R=-1.3$ ($\sigma_a=850\text{MPa}, N_f=1.53\times 10^7$) (b) $R=-1.0$ ($\sigma_a=800\text{MPa}, N_f=2.91\times 10^7$) (c) $R=0$ ($\sigma_a=480\text{MPa}, N_f=9.02\times 10^6$)
Fig2. SEM observation of GBF area of SKH51.

拡大係数範囲を求めた。

表面き裂発生型の介在物寸法($\sqrt{area_{inc,s}}$)に対して

$$\Delta K_{inc,s} = 0.65\sigma \sqrt{\pi \sqrt{area_{inc,s}}} \dots (1)$$

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

$$\Delta K_{inc,i} = 0.5\sigma \sqrt{\pi \sqrt{area_{inc,i}}} \dots (2)$$

GBF 寸法($\sqrt{area_{GBF}}$)に対して

$$\Delta K_{GBF} = 0.5\sigma \sqrt{\pi \sqrt{area_{GBF}}} \dots (3)$$

図3に式(1)~(3)の σ に引張側の応力変動幅を代入して求めた応力拡大係数範囲($\Delta K_{inc,s}^*$, $\Delta K_{inc,i}^*$ および ΔK_{GBF}^*)と破断繰返し数 N_f との関係を示す。図中の破線の範囲は回転曲げ疲労試験で報告されている ΔK_{GBF} の範囲(SKH51 の場合 $\Delta K_{GBF} = 4 \sim 5 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, SUJ2 の場合 $\Delta K_{GBF} = 4 \sim 6 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)を示しており, $\Delta K_{inc,i}^*$ がこの範囲以下の場合には GBF 領域が介在物周囲に形成され, ΔK_{GBF} の値は疲労寿命に依存せず破線の範囲の値をとるとなるとされている。図よりいずれの供試材も応力比によらず $\Delta K_{inc,s}^*$ と $\Delta K_{inc,i}^*$ は N_f の増加に伴い緩やかに減少する傾向が認められる。また, $\Delta K_{inc,i}^*$ が破線の範囲以下の場合には GBF 領域が形成されており, ΔK_{GBF}^* は応力比や疲労寿命によらず破線の範囲内にある。したがって, いずれの供試材も介在物および GBF 領域からの内部き裂の成長には, 引張側の応力変動幅に基づく応力拡大係数範囲が関与していると思われる。

3.4 破壊モードの遷移に及ぼす応力比の影響 図4に S-N 曲線より求めた表面き裂発生型破壊から内部き裂発生型破壊へ遷移する応力振幅 $\sigma_{a,tr}$ (以下, 遷移応力振幅と称す) と応力比との関係を示す。ここで, 遷移応力振幅は各応力比条件で最も長寿命で表面き裂発生型破壊を生じた応力振幅と最も短寿命で内部き裂発生型破壊を生じた応力振幅の平均値として定義し, SKH51 の $R=-1.3$ の場合には表面き裂発生型破壊を生じなかったため最も短寿命で内部き裂発生型破壊を生じた応力振幅に矢印を付してプロットした。図より, 遷移応力振幅は応力比の増加に伴って減少しており, 各供試材の遷移応力振幅と応力比との関係は次式で近似できる。

$$\text{SKH51: } \sigma_{a,tr} = 517(1-R) \dots (4)$$

$$\text{SUJ2: } \sigma_{a,tr} = 794(1-R) \dots (5)$$

3.5 GBF 領域形成に及ぼす応力比の影響 SEM に付属した三次元解析システムを用いて GBF 領域の粗さ測定を行った。図5に例として SKH51 の GBF 領域の中心線平均粗さ R_a , 最大粗さ R_{max} および局部的山頂の平均間隔 S と応力範囲 $\Delta\alpha(=2\sigma_a)$ を用いて内部き裂発生起点の介在物寸法より求めた応力拡大係数範囲 $\Delta K_{inc,i}$ との関係を示す。前述したように SKH51 の $R=-1.3$ の破面には黒くつぶれた箇所やこすれた跡が観察されたことから, 圧縮負荷時のき裂閉口又は試験片破断時に破面がぶつかったために $R=-1.3$ の R_a と R_{max} が本来よりも小さな値となったと考えると, R_a および R_{max} はそれぞれ応力比によらず $\Delta K_{inc,i}$ の増加に伴い増加すると考えられる。また, S と $\Delta K_{inc,i}$ との関係も応力比の依存性はみられず, $\Delta K_{inc,i}$ の増加に伴い減少する一本の直線関係となっている。同様の傾向は SUJ2 でも認められた。従って, GBF 領域の粗さには内部き裂発生起点の介在物寸法より求めた応力拡大係数範囲 $\Delta K_{inc,i}$ が関与していると考えられる。

4. 結 言

(1) SKH51 及び SUJ2 を用い種々の応力比条件で軸荷重疲労試験を行った結果, いずれの供試材も応力比が低いほど短寿命域で内部き裂発生型破壊が発生した。また, 表面き裂発生型破壊から内部き裂発生型破壊へ遷移する応力振幅は応力比に依存して変化することが示された。いずれの供試材も GBF 領域は応力比によらず 10^6 回以上の長寿命域で観察された。

(2) 引張側の応力幅から算出した応力拡大係数 $\Delta K_{inc,i}^*$ が, SKH51 では $4 \sim 5 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下, SUJ2 では $4 \sim 6 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下の場合には介在物周囲に GBF 領域を形成して内部き裂発生型疲労破壊を生じることが明らかとなった。また, GBF 領域に対する応力拡大係数幅 ΔK_{GBF}^* はいずれの供試材も応力比や破断寿命によらずほぼ一定の値となることが示された。

(3) いずれの供試材も, GBF 領域の粗さや局部的山頂の平均間隔 S の値と介在物寸法から求めた応力拡大係数範囲 $\Delta K_{inc,i}$ には相関がみられ, 応力比によらず $\Delta K_{inc,i}$ が大きいほど GBF 領域の粗さが大きく S が小さいことが示された。

参考文献 省略

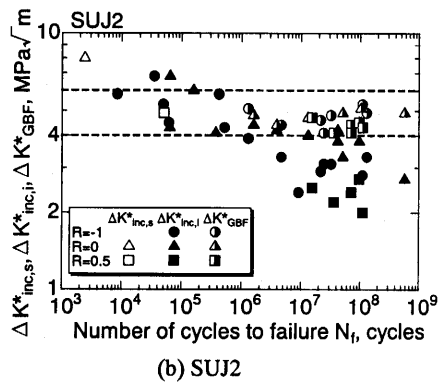
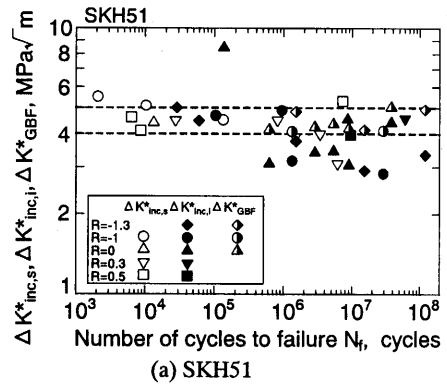


Fig.3 Relationship between $\Delta K_{inc,s}^*$, $\Delta K_{inc,i}^*$, ΔK_{GBF}^* and N_f .

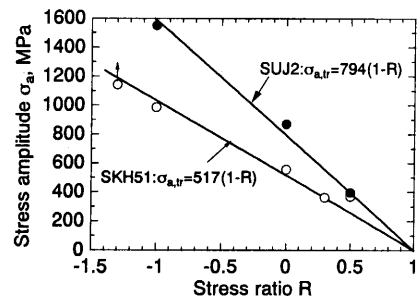


Fig.4 Relationship between $\sigma_{a,tr}$ and R .

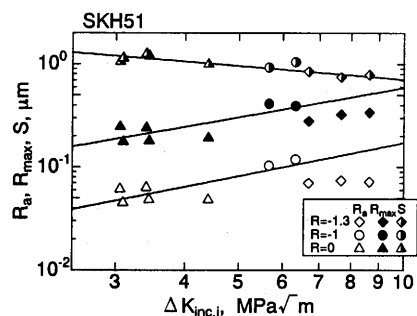


Fig.5 Relationship between R_a , R_{max} , S and $\Delta K_{inc,i}$ of SKH51