

## 高強度鋼の2段折れ曲がり $S-N$ 特性に及ぼす 加工硬化層と表面粗さの影響

中日本自動車短大 ○井藤賀 久岳 岐阜大学 戸梶 恵郎  
豊田高専 中島 正貴 中日本自動車短大 高 行男

### 1. 結 言

高強度鋼の疲労破壊は従来の低・中強度鋼とは異なり、 $S-N$  曲線が2段に折れ曲がることが知られている。これは高応力・短寿命域では表面起点型破壊、低応力・長寿命域では内部起点型破壊となる、異なる破壊機構に起因している。このような破壊起点の遷移は、表面や内部からのき裂発生を抑制または促進する因子（加工硬化層、表面粗さ、残留応力、外部環境、介在物の性状など）によって影響を受ける。すなわち、表面からのき裂発生が促進されると、遷移応力は低下することが予想される。

ところで、機械部品は製作過程において行われる機械加工に依存して様々な表面性状を有する。したがって、これらの部品の疲労強度を評価するためには、表面性状に関する影響因子（加工硬化層や表面粗さ）の役割を把握する必要がある。

そこで本研究では、高強度鋼 SNCM439 に電解研磨および3種類の表面粗さを付与した試験片を用いて室温大気中で疲労試験を行い、バフ研磨による結果と比較することにより、 $S-N$  曲線の形態や破壊機構に及ぼす加工硬化層および表面粗さの影響について検討した。

### 2. 試験片および実験方法

用いた材料は高強度鋼 SNCM439 で、その化学成分(wt.%)は C 0.38, Si 0.30, Mn 0.76, P 0.018, S 0.014, Cu 0.08, Ni 1.72, Cr 0.75, Mo 0.15 である。納入材に焼入れ (880°C・60 分保持後油冷)、焼戻し (200°C・60 分保持後空冷) の熱処理を施した。得られた機械的性質は、0.2%耐力  $\sigma_{0.2}$ : 1490MPa, 引張強さ  $\sigma_B$ : 1863MPa, 伸び  $\delta$ : 9%, 絞り  $\varphi$ : 45% である。試験片は最小断面直径 3.5mm の砂時計型であり、応力集中係数は 1.024 で平滑とみなせる。機械加工後、最小断面周辺をエメリー紙およびバフを用いて順次研磨を行った (BF 材)。次に加工硬化層の影響を検討するために、BF 材の表面層を電解研磨 (約 30 $\mu$ m) により除去した試験

Table 1 Surface roughness and residual stress.

	BF	EP	R10	R16	R19
$R_y$ ( $\mu$ m)	0.66	0.48	10.2	16.4	19.2
$R_a$ ( $\mu$ m)	0.09	0.03	1.39	2.14	3.15
$\sigma_R$ (MPa)	-628	-75	-894	-656	-793

片 (EP 材) および表面粗さの影響を検討するために BF 材の最小断面部を再度エメリー紙で研磨した表面粗さの異なる3種類の試験片 (R10 材, R16 材および R19 材) を用意した。

各試験片の最大高さ  $R_y$  および算術平均粗さ  $R_a$  を表 1 に示す。BF 材と EP 材の  $R_y$  はほぼ同程度 (0.8 $\mu$ m 以下) であり、ほとんど表面粗さが存在しないことがわかる。また硬さは、EP 材では HV600 程度で内部まで一様であったが、BF 材および R 材では表面近傍で高く、HV700 であった。

疲労試験には4連式片持ち回転曲げ疲労試験機 (繰返し速度  $f$ : 3150rpm) を用いて、室温大気中において実験を行った。疲労試験後、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて破面様相を詳細に観察した。また、表面層の残留応力の影響について検討するために、X 線回折装置を用いて応力繰返しに伴う残留応力の変化を測定した。

### 3. 実験結果および検討

**3.1 繰返しに伴う残留応力の変化** 各試験片の表面の残留応力を表 1 に併せて示す。EP 材は電解研磨により圧縮残留応力が除去されており、R 材は粗さ付与によって圧縮残留応力が増加していることがわかる。図 1 に残留応力の応力繰返しに伴う変化を示す。BF 材および EP 材においては、繰返しに伴う残留応力の減衰はほとんど認められず、残留応力は比較的安定に存在することがわかる。一方、R 材においては繰返し数が  $10^3$  回後、圧縮残留応力は大きく減衰し BF 材とほぼ同程度となる。このことから、粗さを付与する際に生じ

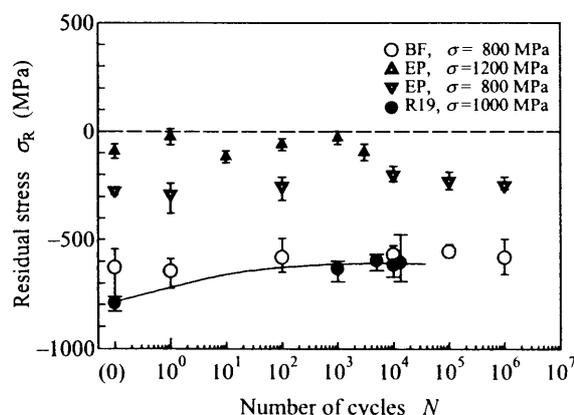


Fig. 1 Changes in residual stress with stress cycling.

た残留応力は疲労試験の初期に減衰するので、BF材とR材に対する残留応力の影響はほぼ同程度であると考えられる。

**3.2 S-N 曲線** BF材およびEP材のS-N曲線を図2に示す。破面の観察結果に基づいて、表面起点型破壊を白印(○, △), fish-eyeを伴う内部起点型破壊を黒印(●, ▲)で区別した。BF材は高応力域では表面起点型破壊、低応力域では内部起点型破壊となり、そのS-N曲線は明瞭な2段折れ曲がりを示す。しかしEP材では、試験を行った範囲内ですべて表面起点型破壊であり、そのS-N曲線は腐食疲労で見られるような滑らかな曲線となる。また著者らは、EP材を用いて乾燥空气中で疲労試験を行った結果、そのS-N曲線は2段折れ曲がり(遷移応力 $\sigma_T=950\text{MPa}$ )を示すことを確認している。BF材が表面起点型破壊を示す応力域( $\sigma>1000\text{MPa}$ )では、BF材とEP材の両材間で疲労寿命に相違が認められ、EP材はBF材に比べて短寿命となる。これは加工硬化層の除去により試験片表面からのき裂発生が促進されたためと考えられる。

次にBF材およびR材のS-N曲線を図3に示す。

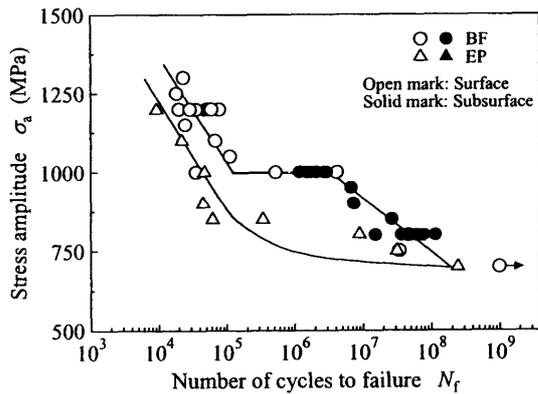


Fig. 2 S-N curves of BF and EP specimens.

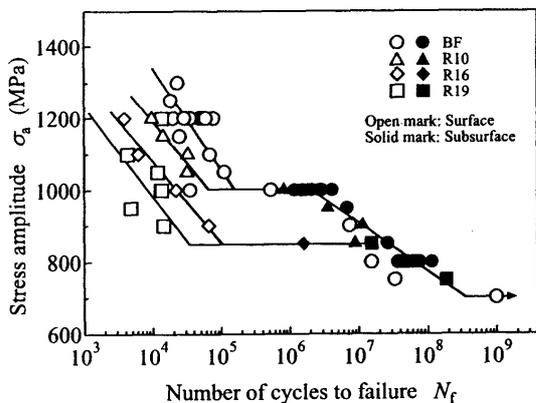


Fig. 3 S-N curves of BF, R10, R16 and R19 specimens.

図2と同様に表面起点型破壊および内部起点型破壊を区別して示した。図中の実線は、各材の表面起点型破壊のデータおよびすべての内部起点型破壊のデータを直線回帰したものである。BF材および各R材ともS-N曲線は2段折れ曲がりを示す。各試験片において内部起点型破壊を生じた最も高い応力を遷移応力と定義すると、遷移応力はBF材およびR10材では1000MPa、R16材およびR19材では850MPaであり、表面粗さの大きい試験片において遷移応力は低下する。また、表面起点型破壊を示す応力域において疲労寿命は異なっており、表面粗さの増加に伴って疲労寿命は短寿命となる。これは表面粗さの凹凸が切欠きとして作用し、表面からのき裂発生が促進されたためと考えられる。一方、内部起点型破壊となる応力域における疲労寿命は、表面粗さの違いによって顕著な差異は認められなかった。これはき裂が内部で発生するために表面粗さの影響を受けないことに起因しており妥当な結果であると考えられる。

**3.3 遷移応力の予測** 表面粗さの増加に伴い遷移応力(表面起点型破壊の疲労限度)が低下することが明らかになったので、表面粗さを微小欠陥とみなして $\sqrt{\text{area}}$ パラメータ法を用いて遷移応力の推定が可能であるか否かについて検討した。検討に当たっては村上らによる表面粗さの等価欠陥寸法の評価法を参考にした。すなわち、試験片の表面粗さの算術平均粗さ $R_a$ およびピッチ $2b$ から等価欠陥寸法 $\sqrt{\text{area}_R}$ を求め、それにより遷移応力(疲労限度)を推定した。したがって、この手法はBF材やEP材のように表面粗さがほとんど無視できる場合には適用できない。得られた結果を表2に示す。なお、表には予測された遷移応力 $\sigma_p$ とともに、実験結果 $\sigma_w$ およびそれとの誤差も付記した。表から明らかなように、予測された遷移応力は表面粗さの増加に伴って低下する。予測結果と実験による遷移応力との誤差は最大 $\pm 7\%$ 程度であることから、この評価方法はS-N曲線が2段折れ曲がりとなる高強度鋼の遷移応力の推定に対しても十分適用できると考えられる。

(結言・参考文献省略)

Table 2 Prediction fatigue limit.

	R10	R16	R19
$2b$ ( $\mu\text{m}$ )	35.7	49.3	55.5
$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )	1.39	2.14	3.15
$\sqrt{\text{area}_R}$ ( $\mu\text{m}$ )	3.91	6.00	8.64
$\sigma_p$ (MPa)	934	870	819
$\sigma_w$ (MPa)	1000	850	850
Error (%)	-6.6	+2.4	-3.6