Effect of Surface Roughness on Step-Wise $S-N$ Curve in High Strength Steel

○正 井藤 賀 久 岳 (中日本自動車短大) 正 戸 梶 恵 郎 (岐阜大工)
 正 中 島 正 貴 (豊田高専) 正 高 行 男 (中日本自動車短大)
 Hisatake ITOGA, Nakanihon Automotive College, Sakahogi-cho, Kamo-gun, Gifu
 Keiro TOKAJI, Gifu University
 Masaki NAKAJIMA, Toyota College of Technology
 Haeng-Nam KO, Nakanihon Automotive College

Key Words: Fatigue, High Strength Steel, Step-Wise $S-N$ Curve, Roughness, Fracture Mode

1. 緒 言

高強度鋼の疲労破壊形態は高応力・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り, それに起因して $S-N$ 曲線が 2 段に折れ曲がることが知られている。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助長する因子(表面粗さ, 残留応力, 加工層, 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, 表面起点型破壊が助長されると, 内部破壊が生ずる応力(遷移応力)は低下する。

ところで, 構造部品は製作過程において行われる機械加工法等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の役割を把握する必要がある。その影響因子のひとつに表面粗さがあり, これまで多くの研究が行われてきた。しかし, 表面粗さと高強度鋼の疲労破壊形態との関連に関する研究はほとんど行われていない。

そこで本研究では, 表面粗さの異なる 4 種類の高強度鋼 SNCM439 を用いて室温大気中において疲労試験を行い, $S-N$ 曲線の形態や破壊機構に及ぼす表面粗さの影響について検討した。

2. 供試材および実験方法

本研究に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℃・60 分保持後油冷), 焼戻し (200℃・60 分保持後水冷) の熱処理を施した。熱処理後の機械的性質は, 0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$: 1490MPa, 引張強さ σ_B : 1863MPa である。ビッカース硬さは表面で 700 程度であるが, 内部に向かって低下し, 表面から 50 μ m 以上では 600 程度である。熱処理後, 最小断面部直径 $\phi=3.5$ mm の砂時計型の試験片形状に機械加工した。その応力集中係数は $\alpha=1.024$ である。

機械加工後, 最小断面部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(この状態の試験片を BF 材とする)。その後, さらにエメリー紙研磨によって表面粗さを付与した (R 材)。最大高さ R_y および算術平均粗さ R_a を表 1 に示す。以後粗さを付与した試験片を R_y を用いて表し, R10 材, R16 材および R19 材と呼ぶことにする。

Table 1 Surface roughness and residual stress.

	BF	R10	R16	R19
Mesh size of emery paper	Buff finished	#100	#60	#40
R_y (μ m)	0.66	10.24	16.47	19.26
R_a (μ m)	0.09	1.39	2.14	3.15
σ_R (MPa)	-628	-894	-656	-793

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, 表面粗さを付与する際に生じ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

3.1 繰返しに伴う残留応力の変化

表面粗さ付与後の残留応力を表 1 に示す。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。そこで, 残留応力の応力繰返しに伴う変化を測定した。一例として R19 材の結果を図 1 に示す。負荷応力は $\sigma=1000$ MPa である。繰返し数 $N=10^3$ 回後, 圧縮残留応力は大きく減衰するが, その後 $\sigma_R=-600$ MPa 程度でほとんど変化しない。この大きさはほぼ BF 材と同等であること, また BF 材の残留応力は応力繰返しによって減衰することなく, 比較的安定に存在すること (前報) などから, 減衰した残留応力は表面粗さを付与することによって生じたものであると考えられる。したがって, 表 1 に示したように粗さ付与後の残留応力は試験片ごとに異なるが, その残留応力の疲労強度に及ぼす影響は無視できると考えられる。

3.2 $S-N$ 曲線

$S-N$ 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。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。

図から明らかなように, BF 材および各 R 材とも $S-N$ 曲

Fig. 1 Relationship between number of cycle and residual stress for R19.

Fig. 2 S-N curves.

線は2段折れ曲がりを示し、破壊起点が表面から内部に移る応力（遷移応力）が明瞭に認められる。すなわち、遷移応力以上の高応力・短寿命域では表面起点型破壊、遷移応力以下の低応力・長寿命域では内部起点型破壊を示す。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材が1000MPa、R16材およびR19材が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。

図から明らかなように、表面起点型破壊となる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減少する。これは表面粗さが増すことにより、表面からのき裂発生が促進されたためであると考えられる。一方内部起点型破壊となる応力域においては、すべての試験片の疲労寿命はほぼ同程度である。これはき裂が内部で発生するので表面粗さの影響を受けないためであり、合理的な結果であると考えられる。

3.3 破面観察

表面起点型破壊の場合、表面粗さに関わらず、き裂は例外なく表面の凹部から発生していた。また、破面から判断されるき裂進展の様相も、表面粗さの違いによる顕著な差異は認められなかった。一旦き裂が発生すると、きわめて初期のき裂進展を除いて表面粗さの影響を受けることはない。表面粗さの増加はき裂の早期発生を促進することにより疲労強度に影響を及ぼすと考えられる。

内部起点型破壊の場合、fish-eyeが観察され、その様相は表面粗さに関係なくほぼ同様であった。すなわち、すべてのfish-eyeはほぼ円形で、その中心付近に介在物が存在し、例外なく試験片表面に内接していた。これらのことから、fish-eyeの形成には表面粗さは影響を及ぼしていないことがわかった。

4. 考 察

4.1 遷移応力（表面起点型破壊の疲労限度）の予測

遷移応力が表面粗さの影響により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を推定することが可能であるか否かについて検討した。なお、推定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 R_a およびピッチ $2b$ から等価欠陥寸法 $\sqrt{\text{area}_R}$ を求め、それにより疲労限度を推定する。したがって、BF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、表には推定された遷移応力とともに、実験結果との誤差も

Table 2 Estimated fatigue limit.

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

Fig. 3 Schematic illustration showing effect of surface roughness on S-N curve.

付記した。表から明らかなように、推定された遷移応力は表面粗さの増加に伴って低下する。推定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も十分適用できると考えられる。

4.2 2段折れ曲がりS-N特性に及ぼす表面粗さの影響

実験結果に基づいて、表面粗さに依存するS-N曲線の形態を模式的に図3に示す。すでに知られているように、BF材のように表面がきわめて平滑であっても、普通高強度鋼のS-N曲線は2段折れ曲がりを示し、遷移応力より高応力側および低応力側では、破壊はそれぞれ表面起点型および内部起点型となる。遷移応力近傍では両起点型破壊が混在することがあるので、その結果疲労寿命のばらつきが大きくなる。10⁷回で実験を打ち切れば、この応力が表面起点型破壊の疲労限度、すなわち見かけ上の疲労限度となる。

表面起点型破壊の応力域においては、表面粗さの増加に伴い疲労寿命は短くなる。これは容易に理解されるように、試験片表面の凹部が切欠きとして作用するため、表面粗さの増加に伴ってき裂が早期に発生することが可能となるからである。また、遷移応力は表面粗さの増加に伴って低応力側にシフトする。これも表面粗さの増加、すなわち凹部が深くなるに伴って表面からのき裂発生が容易となる結果、より低い応力においても表面起点型破壊が生じ易くなるためである。内部起点型破壊の応力域においては、疲労寿命は表面粗さに無関係となる。これは試験片内部で生ずるき裂発生や進展が、表面の性状によって影響されないからである。なお、遷移応力は表面粗さだけでなく他の因子（外部環境や介在物の性状など）の影響も受ける。したがって、当該の材料の遷移応力は複数の影響因子の相互作用下で決まると考えられる。

（結言・参考文献省略）