

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

1 緒 言

高強度鋼は長寿命領域において、非金属介在物を起点として fish-eye を形成する内部起点型疲労破壊を生ずることが知られており、現象の実験的把握や発現機構について多方面から検討が行われている。著者らもこれまでに、内部起点型破壊に及ぼす外部環境、表面性状および清浄度などの因子の影響について明らかにしてきた。

ところで、機械部材および構造物には設計上断面形状の変化部（切欠き）の存在は避けられないことから、疲労強度に及ぼす切欠きの影響の評価は実用的にきわめて重要である。加えて高強度鋼の場合、切欠きに対して敏感であると考えられていること、また切欠きの存在は表面粗さなどと同様に、内部起点型破壊に影響を及ぼすと考えられることから、高強度鋼の疲労における切欠き効果は興味ある問題である。

そこで本研究では、高強度鋼 SNCM439 の 3 種類の切欠き試験片を用いて回転曲げ疲労試験を行い、高強度鋼の $S-N$ 特性に及ぼす切欠きの影響について検討した。

2 実験方法

供試材は直径 16mm の Ni-Cr-Mo 鋼 (SNCM439) 丸棒材であり、その化学成分 (wt.%) は C: 0.38, Si: 0.28, Mn: 0.74, P: 0.019, S: 0.015, Cu: 0.15, Ni: 1.8, Cr: 0.79, Mo: 0.16, Fe: bal. である。素材に $880^{\circ}\text{C} \cdot 1$ 時間保持後焼入れ、その後 $200^{\circ}\text{C} \cdot 1$ 時間保持後空冷の熱処理を施した。熱処理後の機械的性質は、0.2%耐力 $\sigma_{0.2}$: 1494MPa, 引張強さ σ_B : 1956MPa, 伸び ψ : 9% である。また硬さは表面から内部までほぼ一様で HV : 612 である。熱処理後、最小断面部直径 3.5mm, つかみ部直径 10mm の応力集中係数 α の異なる 3 種類の切欠き試験片を機械加工した。 α は 1.16, 1.51 および 2.0 である。

疲労試験には 4 連式片持ち回転曲げ疲労試験機を用い、室温大気中、繰返し速度 52.5Hz で実験を行った。試験後、破面を走査型電子顕微鏡 (SEM) により詳細に観察した。

3 実験結果

3・1 疲労強度 3 種類の切欠き材の $S-N$ 曲線を平滑材 ($\alpha=1.024$) の結果とともに Fig.1 に示す。図中、中空印は表面起点型破壊、中実印は内部起点型破壊を表している。図から明らかなように、 $\alpha=1.16$ の切欠き材では平滑材と同様に、長寿命領域において内部起点型破壊が認められたが、 $\alpha=1.51$ および $\alpha=2.0$ の切欠き材では内部起点型破壊は生じなかった。このことから、外部切欠きの α が約 1.5 以上であれば、内部起点型破壊は消失することがわかる。これは切欠き底の応力集中により表面起点型破壊が助長されるからである。内部起点型破壊の領域では、切欠きの存在にかかわらず疲労寿命は平滑材と同程度であるのに対して、表面起点型破壊の領域では、疲労強度は α の増加とともに低下する。内部起点型破壊が生

じる最も高い応力を遷移応力 ($\alpha=1.51$ と $\alpha=2.0$ の切欠き材に対しては疲労限度) と定義すると、遷移応力は平滑材では 1000MPa, $\alpha=1.16$ の切欠き材では 850MPa, $\alpha=1.51$ および $\alpha=2.0$ の切欠き材では 350MPa である。なお切欠きの鋭さにかかわらず、 $10^8 \sim 10^9$ 回で未破断の試験片に停留き裂は認められなかった。

3・2 切欠き材で観察された内部起点型破壊の特徴 $\alpha=1.16$ の切欠き材で観察された内部起点型破壊の SEM 破面様相の例を Fig.2 に示す。平滑材の場合と同様に、き裂発生箇所には例外なく非金属介在物が存在し、表面に接する fish-eye が認められた。

表面から介在物までの深さ d_{inc} と fish-eye の直径 d の関係を Fig.3 に示す。図中の直線は平滑材のデータに対する回帰直線である。切欠き材では切欠き底に生じた高い応力のために、fish-eye の形状が平滑材と異なることが予想されたが、切欠き材のデータは平滑材とほぼ一致していることから、fish-eye の形状に大きな相違は見られないことがわかる。

Fig.4 に介在物と fish-eye に対する最大応力拡大係数 $K_{max,inc}$, $K_{max,fish-eye}$ と疲労寿命 N_f の関係を示す。 $K_{max,inc}$ は $2 \sim 4\text{MPa}\text{m}^{1/2}$, $K_{max,fish-eye}$ は $5 \sim 15\text{MPa}\text{m}^{1/2}$ あり、 $K_{max,inc}$ および $K_{max,fish-eye}$ の減少

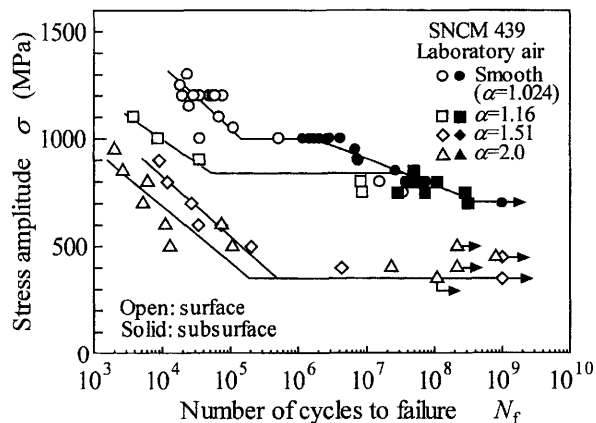


Fig.1 $S-N$ diagram.

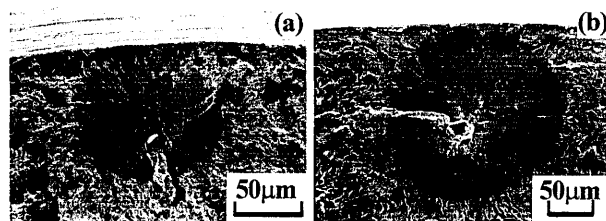


Fig.2 SEM micrographs of subsurface crack initiation site in notched specimens ($\alpha=1.16$): (a) $\sigma=800\text{MPa}$, $N_f=6.23 \times 10^7$, (b) $\sigma=750\text{MPa}$, $N_f=7.17 \times 10^7$.

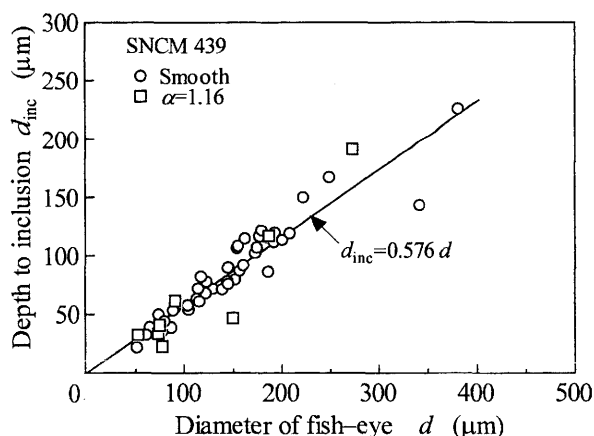


Fig.3 Relationship between depth to inclusion and diameter of fish-eye.

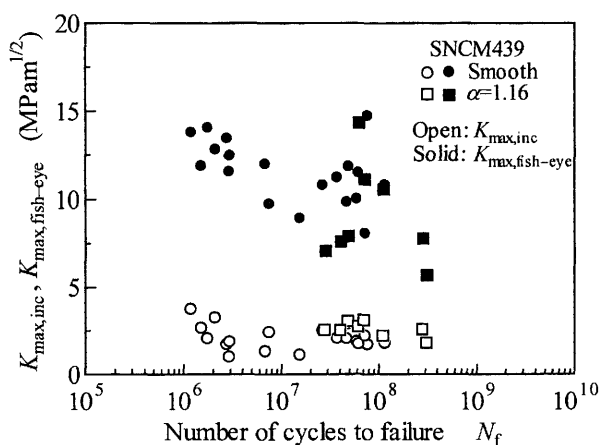


Fig.4 Relationship between stress intensity factor for inclusion and fish-eye and fatigue life.

に伴って N_f は増加する傾向がある。また、切欠き材のデータは平滑材の関係とほぼ一致している。

4 考 察

4・1 切欠き材における内部起点型破壊 Fig.1 に見られたように、 $\alpha=1.16$ の切欠き材では内部起点型破壊が生じたが、 $\alpha=1.51$ および $\alpha=2.0$ の切欠き材では内部起点型破壊は消失し、表面起点型破壊となった。これは容易に推測できるように、切欠き底に生じた最大応力が内部起点型破壊の発生に必要な応力を上回るためである。このように本研究の場合、50%程度以上の応力集中が表面に生じれば、内部起点型破壊が消失することがわかった。

4・2 切欠き材と表面粗さ材の比較 著者らは前報で高強度鋼の内部起点型破壊に及ぼす表面粗さの影響について検討した。そこで、内部起点型破壊を生じた $\alpha=1.16$ の切欠き材と表面粗さ材の $S-N$ 曲線を比較した結果を Fig.5 に示す。なお図中の R10, R16, R19 は、表面粗さの最大高さ R_y がそれぞれ 10.2, 16.5, 19.3 μm の試験片である。表面粗さ材はいずれも、高応力・短寿命領域の表面起点型破壊と低応力・長寿命領域の内部起点型破壊から成る 2 段折れ曲がり $S-N$ 曲線を示す。表面起点型破壊の領域では、表面粗さの増加に伴って疲労強度は低下するが、内部起点型破壊の領域では表面粗さにかかわら

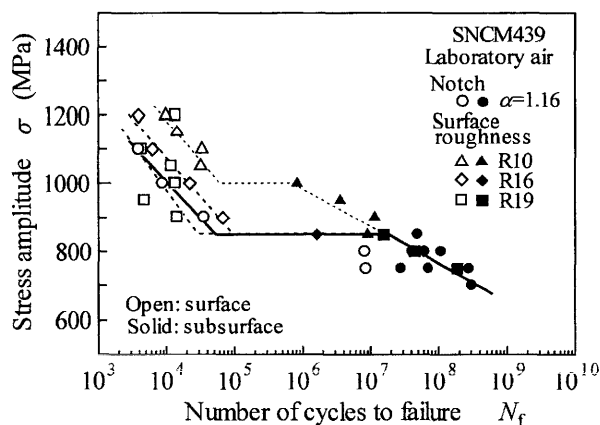


Fig.5 Comparison of $S-N$ characteristics between notched specimens and surface-roughened specimens.

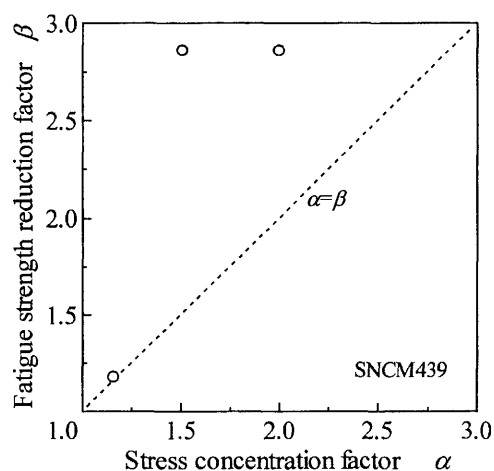


Fig.6 Relationship between fatigue strength reduction factor and stress concentration factor.

ず N_f は同程度である。一方 $\alpha=1.16$ の切欠き材の $S-N$ 曲線は、表面起点型破壊の領域では R19 の結果とほぼ一致している。このことから $\alpha=1.16$ の切欠き材は $R_y=19.3\mu\text{m}$ の表面粗さと等価である。なお、内部起点型破壊の領域の N_f は表面粗さ材と一致していることから、内部起点型破壊の疲労強度は切欠きや表面粗さなどの表面性状に影響を受けないことがわかる。

4・3 切欠き感受性 平滑材および $\alpha=1.16$ の切欠き材では遷移応力を疲労限度と見なし、切欠き係数 β と α の関係を Fig.6 に示す。よく知られているように通常 $\beta < \alpha$ であるが、本研究の場合、 α が大きいとき $\beta > \alpha$ となっている。この原因は不明であるが、本供試材は切欠きに対してきわめて敏感であると言える。

5 結 言

高強度鋼 SNCM439 の 3 種類の切欠き試験片 ($\alpha=1.16, 1.51, 2.0$) を用いて回転曲げ疲労試験を行い、 $\alpha=1.16$ の切欠き材では内部起点型破壊が生じるが、 $\alpha=1.51$ および 2.0 の切欠き材では消失すること、 $\alpha=1.16$ の切欠き材の疲労強度は $R_y=19.3\mu\text{m}$ の表面粗さ材と等価であること、本供試材は切欠きに対してきわめて敏感であることなどを明らかにした。

(参考文献省略)