フィッシュアイを伴う丸棒試験片のき裂進展挙動[†]

夏 目 喜 孝* 宮 川 進*

Behavior of Crack Propagation in the Test Piece of Circular Section with "Fish Eye"

by

Yoshitaka NATSUME* and Susumu MIYAKAWA*

The behavior of crack propagation in the complete reversed tensile and compressive fatigue test piece of circular section with Fish eye of the heat treated high-speed steel was investigated by using an acoustic emission technique. Moreover, the property of crack propagation in the 1/2CT test piece was investigated.

The results obtained are summarized as follows ;

(1) The number of stress cycles N_{AE} for crack initiation and propagation and the number of stress cycles N_f for fracture were accurately estimated by measuring continuously AE total ringdown counts during the fatigue process.

(2) The fatigue life was good accord with the value of N_f estimated by the acoustic emission technique. The life of fatigue crack propagation $(N_f - N_{AE})_{Lab.}$ was 25~50% of the fatigue life N_f and decreased with decreasing stress amplitude.

(3) The life of fatigue crack propagation $(N_f - N_{AE})_{cal.}$ calculated from the property of crack propagation in the 1/2CT test piece showed good agreement with the value of $(N_f - N_{AE})_{Lab.}$ obtained by the acoustic emission technique.

(4) The behavior of crack propagation in the complete reversed tensile and compressive fatigue test piece of circular section showed good correlation with the behavior of crack propagation in the 1/2CT test piece, so that it is suggested that the initiative mechanism of residual stress on the fracture surface with Fish eye can be discussed by using the 1/2CT test piece.

Key words : Fish eye, Crack propagation, Acoustic emission

1 は じ め に

高い圧縮強度と優れた耐摩耗性を有する高速度工具鋼は切削工具・冷間鍛造型などに広く利用されてきたが、最近では自動車摺動部品への適用も増加してきた。高速度工具鋼に関する研究は熱処理と硬さに関するものが多く、この他に静的抗折試験やシャルピー試験などのデータが工具鋼メーカーにより公表されている。

筆者らは高速度工具鋼の回転曲げ疲労強度に及ぼす表面粗さの影響、および引張・圧縮疲労強度について一連の研究を行い、フィッシュアイを伴った放射状き裂進展後、ぜい性的に破壊することを放射状き裂進展部分を初期き裂として仮定した破壊じん性値 K_{rc} と 1/2CT 試験片による破壊じん性値 K_{Ic} が等しくなり $K_{rc} = K_{Ic}$ となることを明らかにした⁵⁾。さらに細束 X 線フラクトグラフィにより検討を加え、放射状き裂進展部分の破面残留応力は K_{max} に支配され、 K_{max} の増大に伴い圧縮から引張となり、ぜい性破面残留応力は

K_{max} に関係なく一定の引張となることを報告した⁶⁾。

本報告は引張・圧縮丸棒試験片の引張・圧縮疲労試験過程において試験片内部が疲労き裂開始点となるフィッシュアイを伴う疲労き裂進展挙動を位置同定が可能な AE 技術を用いて評価した。また 1/2CT 試験片の疲労き裂進展挙動について実験的検討を加え、丸棒試験片内部の疲労き裂進展挙動と対比検討した。

2 実 験 方 法

2・1 試験片および熱処理条件

実験に用いた材料は高速度工具鋼 SKH-51 であり、

Table I. Chemical compositions of material.
(JIS SKH 51) wt %.

C	Si	Mn	P	S	Cr	W	Mo
0.81	0.31	0.29	0.018	0.002	3.92	6.10	4.85
V	Co	Cu	Ca	Al	Mg	O	
1.81	0.46	0.07	0.004	0.035	0.0005	0.0018	

[†] 本報を「高速度工具鋼の引張・圧縮疲労強度に関する研究(第3報)」(Study on the Tensile and Compressive Fatigue Strength of High-Speed Steel, III)とする。

原稿受理 昭和63年9月12日 Received Sep. 12, 1988

* 正 会 員 日本電装(株) 刈谷市昭和町, Nippondenso Co., Ltd., Showa-cho, Kariya

Table II. Mechanical properties of annealed test material.

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	True fracture strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
587	746	1150	22.6	33.8

Fig. 1. Dimensions of fatigue specimen.

発光分光分析によって得られた化学成分および焼ならし状態での機械的性質は、Table I, Table II に示すとおりである。

素材は直径 35 mm の焼ならし材を入手し、Fig. 1 に示す寸法・形状に仕上げ、引張・圧縮疲労試験片とした。試験片の平行部外径表面はあらかじめ研削仕上げを行い、熱処理後、表面粗さが最大高さ粗さ R_{max} で $0.6 \sim 1.4 \mu m$ になるようにラッピング加工した。試験片の熱処理は引張・圧縮試験片 1 の場合焼入れ温度 $1180^{\circ}C$ 、引張・圧縮試験片 2 の場合焼入れ温度 $1100^{\circ}C$ で各 2 分間加熱後、 $180^{\circ}C$ の温浴中へ焼入れを行った。次いで、焼もどし処理は $580^{\circ}C$ の温浴中で 1.5 時間保持後空冷するヒートサイクルを 3 回行った。

熱処理後の試験片断面の硬さ分布は、焼入れ温度によって硬さは相違するものの、いずれの温度で処理した試験片も全断面が均一な硬さとなっており、引張・

Table III. Mechanical properties of quenched and tempered test material.

Specimen	0.2 % proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
Specimen 1 (HRC 60)	2270	2560	2.0	0
Specimen 2 (HRC 56)	1820	2110	2.9	3.7

Fig. 2. Dimensions of 1/2CT specimen.

圧縮試験片 1 は HRC60、引張・圧縮試験片 2 は HRC56 である。

焼入れ焼もどし処理した試験片の静的強度特性は試験片の中央部にひずみゲージを貼り、0.2% 耐力および引張強さを測定し、その結果を Table III に示す。

疲労き裂進展実験に用いた 1/2 CT 試験片の寸法・形状を Fig. 2 に示す。1/2 CT 試験片の焼入れ焼もどし処理条件は引張・圧縮疲労試験片と同一とし、それぞれき裂進展試験片 1、き裂進展試験片 2 とした。試料採取方向は R-L 方向であり、熱処理後過飽和リン酸クロム酸溶液で電解研磨を行い表面層を $50 \mu m$ 除去した。

2・2 疲労き裂進展実験

き裂進展試験片 1 およびき裂進展試験片 2 の疲労試験は、電気油圧サーボ式疲労試験機で荷重制御のもとで応力比 $R=0.05, 0.3$ の片振り引張状態で行った。繰返し荷重波形は正弦波で、繰返し速度を 10Hz とした。疲労き裂進展実験は ASTM E647-81⁷⁾を満足するように疲労き裂長さを 100 倍の光学顕微鏡により測定し、疲労き裂進展速度はセカント方式により求め、J. E. Srawley の式⁸⁾により応力拡大係数 K を求めた。

2・3 引張・圧縮疲労試験過程のき裂進展挙動

引張・圧縮疲労試験過程におけるき裂進展挙動評価に用いた AE 装置はダネガン社の 8000 型であり、装置のブロックダイアグラムは Fig. 3 に示すとおり、変換器・フィルター・アンプ・コンピュータから構成されている。本装置はき裂、欠陥の直線および平面上の位置検出をリアルタイムに求めるために 4 チャンネルから構成されている。外部環境ノイズの除去は直線位置検出と同じように 2 チャンネルを用い、2 個のセンサー間で発生する AE 信号を計測器中に内蔵されている到着時間差法によって分離した。測定条件は Table IV に示すとおりである。

Fig. 3. Block diagram of AE measuring system.

Table IV. Condition of AE measurement.

Pre amplifier gain	40 dB
Main amplifier gain	70 dB
Bandpass filter	100 kHz~1 MHz
Threshold	42 dB
Difference in arrival times	10 μ sec
Rise time	1 μ sec~500 μ sec

前報⁵⁾までにおいて応力振幅と破壊までの繰返し数の関係から破壊確率 50% となる時間疲労強度の直線回帰式を求めた。本報は両振りの直線回帰式を用い、応力振幅を 588 ~ 1078 MPa の間において 5 レベル選定し、き裂進展挙動を評価した。

3 実験結果および検討

3・1 引張・圧縮疲労試験結果と AE 挙動

引張・圧縮試験片 1 の両振り引張・圧縮疲労試験過程において、AE を連続測定した時の $S-N$ 曲線を Fig. 4 に示す。なお、Fig. 4 中には前報⁵⁾において 14 $S-N$ 法で求めた時間強度および耐久限度の平均値と標準偏差を併記した。本報の結果は前報の時間疲労強度のばらつき範囲の下限値側の寿命となっている。

一般に疲労損傷と AE 総カウント数の関係については、すべり線の発生またはき裂の進展挙動とよい対応があると報告されている。Fig. 4 に示した引張・圧縮応力振幅と寿命の関係の有する試験片の疲労過程における AE 総カウント連続測定結果の一例を Fig. 5 に

Fig. 4. $S-N$ curve of specimen 1.

示す。疲労過程の初期段階では AE 信号がカウントされず任意繰返し後、AE 信号が一定の割合で増加する領域と急増する領域とが存在する。

AE 信号のカウント数が一定の割合で増加し始める繰返し数を N_{AE} とし、急増する繰返し数を N_f とする。AE 信号の連続測定の結果より、Fig. 5 中の N_{AE} を疲労き裂が発生・進展し始めた繰返し数、 N_f を破損繰返し数と仮定した。なお、疲労試験結果より破損繰返し数は疲労寿命と一致している。

引張・圧縮疲労丸棒試験片の疲労き裂進展寿命は $(N_f - N_{AE})_{Lab.}$ で表され、疲労寿命 N_f との間には Fig. 6 に示す関係が存在する。

疲労寿命 N_f に占める疲労き裂進展寿命 $(N_f - N_{AE})_{Lab.}$ は 882 MPa 以上の高応力振幅領域においては 41 ~ 50% であり、882 MPa 未満の低応力振幅領域においては 25 ~ 35% となっており、応力振幅の低下に従い疲労き裂進展寿命 $(N_f - N_{AE})_{Lab.}$ は短くなる。

3・2 1/2 CT 試験片の疲労き裂進展挙動

Fig. 4 に示した $S-N$ 曲線の引張・圧縮疲労丸棒試験片の破面は、非金属介在物を起点とし、放射状に広がるフィッシュアイが認められる。引張・圧縮疲労試験において生じるフィッシュアイは疲労過程において非金属介在物の切欠作用（応力集中）により、非金属介在物周辺に疲労き裂が発生し、応力軸に垂直な面内を疲労き裂が放射状に進展し、生じた疲労破面と考えられる。

そこで、非金属介在物から発生した疲労き裂進展挙

Fig. 5. Typical experimental result of AE test.

Fig. 6. The relation between N_f and $(N_f - N_{AE})_{Lab.}$.

Fig. 7. Crack propagation rate versus stress intensity factor range.

動を明らかにするために 1/2 CT 試験片の疲労き裂進展挙動について検討した。

硬さが異なるき裂進展試験片 1 およびき裂進展試験片 2 に一定の繰返し荷重を負荷した時の疲労き裂進展速度 dl/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係を Fig. 7 に示す。

両試験片とも同一応力拡大係数幅 ΔK 時、応力比 $R=0.3$ の方が $R=0.05$ に比べ、疲労き裂進展速度 dl/dN がやや早いものの応力比および硬さの影響は小さい。

Fig. 7 から明らかなように、疲労き裂進展速度 dl/dN が $5 \times 10^{-9} \sim 5 \times 10^{-8}$ m/cycle の範囲における疲労き裂進展速度 dl/dN と応力拡大係数幅 ΔK の関係は、応力比、硬さによらず狭い帯の直線関係と考えられ、式(1)の Paris 則で整理し、疲労き裂進展に関する材料定数 C と m 値を求めた。

$$\begin{aligned} dl/dN &= C(\Delta K)^m \\ C &= 3.52 \times 10^{-12} \\ m &= 3.42 \end{aligned} \quad (1)$$

式(1)を用いることにより、硬さ範囲が HRC56～60、

応力比範囲が 0.05～0.3 である高速度工具鋼の疲労き裂進展寿命を求めることができる。

3.3 引張・圧縮疲労丸棒試験片の疲労き裂進展挙動

丸棒試験片内部の非金属介在物を疲労き裂開始点とする疲労き裂は円板状き裂に一樣垂直応力が負荷されるとすると仮定し、疲労き裂進展過程の解析に式(2)の無限体中の円板状き裂に一樣垂直応力が負荷される応力拡大係数幅 ΔK を用いた。

$$\Delta K = (2/\pi) \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

$\Delta \sigma$ …引張・圧縮疲労試験時の引張側応力振幅
 a …き裂長さ

丸棒試験片内部の疲労き裂進展寿命 $(N_f - N_{AE})_{cal.}$ は式(2)を代入した式(1)を積分し求めた式(3)で表される。

$$\begin{aligned} (N_f - N_{AE})_{cal.} &= \frac{10^{12}}{3.78(\Delta \sigma)^{3.42}} \left(\frac{1}{a_i^{0.71}} - \frac{1}{a_f^{0.71}} \right) \end{aligned} \quad (3)$$

$\Delta \sigma$ …引張・圧縮疲労試験時の引張側応力振幅
 a_i …初期疲労き裂長さ
 a_f …破壊時疲労き裂長さ

非金属介在物が丸棒試験片表面に存在し、疲労き裂が表面から発生する場合の疲労き裂進展寿命 $(N_f - N_{AE})_{cal.}$ は式(4)で表される。

$$\begin{aligned} (N_f - N_{AE})_{cal.} &= \frac{10^{12}}{17.7(\Delta \sigma)^{3.42} I^{3.42}} \left(\frac{1}{a_i^{0.71}} - \frac{1}{a_f^{0.71}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$\Delta \sigma$ …引張・圧縮疲労試験時の引張側応力振幅
 a_i …初期疲労き裂長さ
 a_f …破壊時疲労き裂長さ
 I …補正係数

$$I = \frac{1 + 0.12(1 - a/2c)^2}{(1 + 1.464(a/c)^{1.65})^{0.5}}$$

(本報告の場合、アスペクト比 $a/c=0.5$ とした。)

なお、初期疲労き裂長さとしては非金属介在物寸法

Fig. 8. The relation between $(N_f - N_{AE})_{Lab.}$ and $(N_f - N_{AE})_{cal.}$.

を、破壊時疲労き裂長さとしてはフィッシュアイ寸法を用いた。

1/2CT 試験片の疲労き裂進展挙動により算出した引張・圧縮疲労き裂進展寿命 $(N_f - N_{AE})_{cal.}$ と AE 総カウント数連続測定により求めた引張・圧縮疲労き裂進展寿命 $(N_f - N_{AE})_{lab.}$ の間には Fig. 8 に示すようによい対応関係が存在する。

したがって AE 総カウント数連続測定により決定した AE 一定増加繰返し数 N_{AE} は非金属介在物より疲労き裂が発生・進展し始めた繰返し数と考えられ、先に仮定した仮説の妥当性を示すものと言える。

この事は疲労き裂発生・進展し始める繰返し数 N_{AE} および破壊繰返し数 N_f を AE によって精度よく検出でき、AE 技術がフィッシュアイ型疲労き裂の発生・進展挙動の評価技術として有効であることを示している。

そして引張・圧縮丸棒試験片の破面残留応力が 1/2CT 試験片の破面残留応力により検討できる可能性を示唆している。

今後、フィッシュアイ型疲労破面上の残留応力が $20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以下の低 K_{max} 領域で圧縮残留応力となり、 $20\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 以上で引張残留応力となるメカニズム解析のために 1/2CT 試験片を用いて低 K_{max} 領域、高 K_{max} 領域の疲労き裂先端と近傍の負荷過程の応力分布および残留応力分布について検討を加え、フィッシュアイ型疲労破壊における破面残留応力発生モデルを考察したい。

4 ま と め

高速度工具鋼 SKH-51 の両振り引張・圧縮疲労丸棒試験片のフィッシュアイ型疲労き裂進展挙動を位置同定が可能な AE 技術を用いて評価するとともに、1/2CT 試験片の疲労き裂進展試験により疲労き裂進展特性について検討した結果、次の結論を得た。

(1) 疲労過程において AE 総カウント数を連続測定することにより、疲労き裂発生・進展し始める繰返し数と思われる N_{AE} と破壊繰返し数と思われる N_f がよく検出できる。

(2) 疲労寿命と AE 技術から求めた破壊繰返し数 N_f とはよく一致し、疲労寿命 N_f に占める疲労き裂進展寿命 $(N_f - N_{AE})_{lab.}$ は 882MPa 以上の高応力振幅領域においては $41 \sim 50\%$ であり、 882MPa 未満の低応力振幅領域においては $25 \sim 35\%$ となっており、応力振幅の低下に従い疲労き裂進展寿命 $(N_f - N_{AE})_{lab.}$ は短くなる。

(3) 1/2CT 試験片により得られた疲労き裂進展特性から算出した引張・圧縮疲労き裂進展寿命 $(N_f - N_{AE})_{cal.}$ と AE 測定により求めた引張・圧縮疲労き裂寿命 $(N_f - N_{AE})_{lab.}$ がよく対応することより、AE 測定で得られる N_{AE} は疲労き裂発生・進展し始める繰返し数であるとする上述の仮説の妥当性を証明することができた。

(4) 引張・圧縮疲労丸棒試験片の疲労き裂進展挙動と 1/2CT 試験片の疲労き裂進展挙動の間にはよい対応関係があることにより、フィッシュアイ破面の破面残留応力発生メカニズムを 1/2CT 試験片により検討できる可能性が示唆された。

(昭和63年7月21日 第25回 X 材料強度に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 杉山道生, 山本長邦, 古沢浩一, 田中一英, 鉄と鋼, **56**, 751 (1970).
- 2) 新持喜一郎, 浦野元一, 塑性と加工, **12**, 229 (1971).
- 3) 谷沢祥宏, 愛知県工業技術センタ報告, **17**, 77 (1978).
- 4) 村松 勁, 夏目喜孝, 塑性と加工, **20**, 957 (1978).
- 5) 夏目喜孝, 宮川 進, 村松 勁, 材料, **37**, 606 (1988).
- 6) 夏目喜孝, 宮川 進, 材料, **37**, 612 (1988).
- 7) Annual Book of ASTM Standards.
- 8) J. E. Srawly, Int. J. Fract., **12** (1976) 475.
- 9) 吉村達彦, 加納重人, 日本機械学会論文集, A-53, 491, 1173 (1987).
- 10) 岸 輝雄, 材料, **29**, 908 (1980).
- 11) 結城良治, 北川英夫, 鈴木敬愛, 石川晴雄, 生研セミナーテキスト, 77 (1985).