X線フラクトグラフィにおける圧縮残留応力†

児玉 昭太郎* 三 沢 啓 志* 大 住 勝 彦**

Compressive Residual Stress in X-Ray Fractography

by

Shotaro KODAMA*, Hiroshi MISAWA* and Katsuhiko OSUMI**

X-ray fractography is a technique for analysing the cause and mechanism of fracture from the information obtained by X-ray irradiation on the fractured surface. It has been shown that a good correlation exists between the residual stress on the half value breadth of diffraction profile and the stress intensity factor that had caused the fracture. X-ray fractography has been successfully applied for the in-service fracture of many types of fracture. However, in some cases the residual stresses on the fatigue fractured surface in service are compressive, which have not been found in the laboratory experiments so far.

In the present study, fatigue experiments were carried out on 0.5% carbon steel to investigate the stress condition that produces compressive residual stress on the fractured surface. The specimen was a center notched rectangular plate of 8 mm thick, and a wide range of stress ratio $R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}$ were applied from tensile to compressive, namely $R = 0.50, 0.25, 0.20, 0.00, -1.67, -2.33, -2.40$ and -3.00 . From the results of experiments, it was found that, when the stress ratio was -3.00 and the minimum stress was -150 MPa, the residual stress on the fractured surface became compressive. Since the minimum stress is far smaller than the compressive yield stress, the cause of the compressive residual stress was considered to be the result of crack closure. In this case, the crack opening ratio $U = (\sigma_{\max} - \sigma_{op})/\Delta\sigma$, where σ_{op} is the crack opening stress, was about 0.3 and almost constant through the crack length.

キー・ワード：破壊，疲労，X線フラクトグラフィ

1 は じ め に

X線を材料の破断面に照射して、得られる情報からその部材が破断に至る原因となった力学量を推定し、破断原因を判定しようとする方法が、北川・松本らによってX線フラクトグラフィと名付けられてから11年になる。破断面にX線を照射して、その回折像の変化など各種の情報から、破断の原因となった力学的諸量を推定することは、すでにその数年前から、平・田中ら^{2)~6)}によって試みられ、成功を収めているので、これを合せば20年に近い研究の歴史となる。X線フラクトグラフィは、その手法も名称も、世界に先駆けて我国で開発されたものであり、近年では、フランス・ドイツなどでも注目されており、X線フラクトグラフィは、国際的にその有用性を認められるようになった。この間、疲労破面、破壊じん性破面、衝撃破壊面、応力腐食割れ破面、転動疲労破面など、各種の破断面に関する研究が、日本材料学会X線材料強度部門委員会を中心に行われ、破壊の原因となった力学諸量の定量的な推定に有効な手段であることが、漸時確認されてきた。X線フラクトグラフィは、電子顕微鏡を用いて破断面

の形状を観測するエレクトロンマイクロスコープフラクトグラフィとは、基本的な測定原理に相違があり、両者を併用することにより、一層の効果を上げ得るものと期待される。X線フラクトグラフィでは、破断面が腐食、さび、汚染、接触などによって損傷されている場合でも、電解研磨などの方法により、表面層を除去して、深さ方向に順次測定を行うことにより情報を得ることができる。また、鋳鉄の疲労破面などのように、エレクトロンマイクロスコープフラクトグラフィでは、無特徴破面となって実施困難な場合でも適用できる利点がある。

現在までに発表されたX線フラクトグラフィの報告は、実験室における基礎的な研究が多いが、実物の破断面に適用して成功した例も少なからず報告されている。実物に適用した場合の未解決の大きな問題の一つは、実験室の疲労破面で得られる表面残留応力は、これまでの所、すべて引張残留応力であるが実物の破断面には、圧縮の残留応力の現れる例があることである。例えば、永井・北川らは実物の疲労破断面6例のうち4例が、圧縮の残留応力であったとしている。またフ

† 原稿受理 昭和61年12月25日 Received Dec. 25, 1986

* 正 会 員 東京都立大学工学部 東京都世田谷区深沢, Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan University, Fukazawa, Setagaya-ku, Tokyo

** (株)セイロジャパン 東京都港区高輪, Saeilo Japan, Takanawa, Minato-ku, Tokyo

ランスのパリ工科大学 (ENSAM) の Maeder らも、発電機シャフトの疲労破断面の残留応力は圧縮であると述べている。

そこで、本研究では実験室内で疲労破面に圧縮残留応力を発生させる条件を探る目的で、疲労試験とX線フラクトグラフィの測定を行った。

2 実験方法

2.1 供試材および試験片

本実験に用いた材料は、JIS S50C材で、その化学成分を Table I に示す。材料は850℃に30分保持後、焼ならしたものをを用いているが、熱処理後の機械的性質は Table II に示すとおりである。

Table I. Chemical composition (wt%).

Material	C	Si	Mn	P	S
S50C	0.50	0.20	0.60	0.22	0.19

Table II. Mechanical properties.

Material	σ_Y	σ_B	φ	ψ
S50C	453 MPa	692 MPa	22.6%	52.0%

σ_Y =Yield stress

σ_B =Ultimate tensile strength

φ =Elongation

ψ =Reduction of area

試験片は、長方形平板で厚さ $t=8$ mm, 幅 $B=50$ mm の a タイプと、厚さ $t=8$ mm, 幅 $B=85$ mm の b タイプの2種がある。a タイプは引張平均応力の疲労試験に、b タイプは圧縮平均応力の試験に用いた。中央の切欠きは、 $\phi 6$ mm のドリル穴から、左右に2 mm ずつ $\phi 0.2$ mm のワイヤによるワイヤカットによるスリットが入っている。試験片表面は、エメリーペーパー-06番まで研磨し、さらに、き裂進展部分は市販の金属磨き剤を用いて観測を容易にした。試験片の形状寸法を Fig. 1 および Fig. 2 に示す。

2.2 疲労試験機および実験方法

疲労試験には、閉ループ型電気油圧式試験機で容量100 KN のものを用いた。試験中の繰返し速度は、20

Fig. 1. Geometry of specimen. (Type a)

Fig. 2. Geometry of specimen. (Type b)

Hz であるが、き裂開閉の現象を測定する場合には、0.1 Hz で行った。また、圧縮応力のかかる試験では、座屈防止のため、き裂進展部を除いて、ほぼ試験片全体を掴み治具で固定する方法を採用した。

き裂長さの測定には、0.01 mm まで読み取り可能な光学測定顕微鏡を用いた。

き裂先端の開閉現象の測定には、引算回路を用いる除荷弾性コンプライアンス法を利用した。き裂前方の変位量は、あらかじめ5枚の抵抗線ひずみゲージを貼っておき、き裂先端に最も近い位置のゲージで測定を行った。

X線による残留応力測定は、疲労破面上で、き裂進展方向に行った。残留応力の計算には、定時計数法による n 点放物線近似法を用いた。すなわち、 $2\theta=0.2^\circ$ のステップスキャンで20秒ずつ計数しピーク強度から15%下までの点によって放物線近似を行った。 n は10~12であった。X線応力測定条件は Table III に示すとおりである。X線照射域は、き裂進展方向に0.8 mm としたので、得られた残留応力値はこの間の平均値となるが、0.8 mm の間の応力拡大係数の変化は、測定した最も短いき裂の場合でも $\pm 3\%$ 以下である。なお、残留応力測定の再現性は ± 15 MPa 以下の範囲に入っていると考えられる。

Table III. Condition of X-ray stress measurement.

Characteristic X-ray	Cr-K α
Diffraction plane	α -Fe(211)
Slit divergence angle	0.26°
Filter	V foil
Counter	Scintillation counter
Voltage	30 kV
Current	9 mA
Irradiated area	0.8×6.0 mm ²
Preset time	20 sec

3 実験結果および考察

3.1 疲労き裂進展速度

本研究では、Table IV に記した応力条件により疲労試験を行った。その結果を疲労き裂進展速度 da/dN

Table IV. Stress condition for fatigue experiment.

No.	R	$\Delta\sigma$	σ_{mean}	σ_{max}	σ_{min}
1	0	100	50	100	0
2	0.2	80	60	100	20
3	0.25	75	62.5	100	25
4	0.5	75	112.5	150	75
5	-1.67	200	-25	75	-125
6	-3.0	200	-50	50	-150
7	-2.33	200	-40	60	-140
8	-2.4	170	-35	50	-120
9	-3.0	160	-40	40	-120

Fig. 3. Effect of stress ratio on fatigue crack propagation rate vs. stress intensity factor range.

と応力拡大係数範囲 ΔK との関係で示したのが Fig. 3 である。疲労き裂進展速度は、明らかに応力比依存性を示し、白マークの平均応力が引張りのものは、黒マークの平均応力が圧縮の場合と、はっきり別のグループを形成している。引張平均応力のグループで見ると、応力比が高いほど疲労き裂進展速度は速くなる傾向があるが、全体としては、大体 1 本バンドの中にあるようである。これに対して、平均応力が圧縮の場合には、実験点はかなり広い範囲に散在している。そして、応力比の絶対値が大きい方が疲労き裂進展速度が遅いとは言えないようである。ただし、応力振幅が等しい場合に限れば、この実験の範囲内では、応力比の絶対値の大きいものの方が疲労き裂進展速度が遅いと言える。圧縮平均応力が負荷される場合、圧縮応力成分が大きくなるとき裂は発生するものの、ごく初期で進展を停止してしまうこともあり、試験機の容量による制限もあって、より広範な応力条件で実験を行うことは

困難であった。

いずれにしても、 ΔK で整理すると応力拡大係数を用いているにも拘らず、実験点は一義的には表現できない。そこで、応力振幅のうち圧縮応力成分を無視して最大応力拡大係数 K_{max} を縦軸にとって整理したのが Fig. 4 である。図から分るように、応力比がマイナスのグループ、つまり平均応力が圧縮である実験点は大きく左側に移動して、引張平均応力のグループに近づいてくる。しかし、バンドの幅は、まだかなり広い。

さらに、除荷弾性コンプライアンス法による疲労き

Fig. 4. Effect of stress ratio on fatigue crack propagation rate vs. maximum stress intensity factor.

Fig. 5. Effect of stress ratio on fatigue crack propagation rate vs. effective stress intensity factor range.

Fig. 6. Crack opening ratio.

裂開閉口現象の測定結果から、有効応力拡大係数を計算して、これを横軸にとって実験結果を表したのが Fig. 5 である。これによれば、全部の実験点がほぼ1本のバンドの中に入る。き裂開口比 U は、疲労き裂進展速度線の直線域においては、ばらつきはあるがほぼ一定であった。平均応力が圧縮の場合の開口比 U の測定結果を Fig. 6 に示す。

3・2 破断面残留応力

Table III に示した条件で、疲労破面上のき裂進展方向の残留応力を測定した結果を、応力拡大係数範囲 ΔK に対してプロットしたのが Fig. 7 である。大部分の残留応力は、引張りであるが、Table IV の No. 6 で示した応力比 $R = -3.0$ のものでは残留応力が圧縮になっている。平均応力が引張りのものについては、従来の研究結果と同様で、 ΔK が小さい範囲では、疲労き裂の進展とともに引張残留応力が大きくなり、ピークに達した後減少する傾向を示す。

圧縮平均応力が作用していると破面上の残留応力が引張りである場合でも、その値は引張平均応力が作用

している場合の値に比べて、かなり低くなっている。圧縮平均応力が大きい程、残留応力は圧縮に近づき、No. 6 の応力比 $R = -3.0$ では、疲労き裂の全長にわたって残留応力は圧縮となる。また、応力比 $R = -2.4$, -3.0 においては、残留応力はピークを持たないで、単調に引張側に变化していく。この現象は応力比 R が -2.4 より大きくなると現れるが、実質的に大差ない応力比 $R = -2.33$ では、疲労き裂の長い部分で破面上の引張残留応力が減少するので、必ずしも応力比だけによって定まるものではない。

No. 8 の $R = -2.4$ において引張残留応力が他のものに比べてかなり高いこととともに今後検討を要する問題点である。No. 9 $R = -3.0$ の実験は、疲労破面上の残留応力が圧縮になる応力条件を探る目的で行ったもので、応力比 R は、No. 6 と同じ -3.0 とし、応力振幅を160 MPaにさげたものである。この条件では、Fig. 6 に示すように疲労破面上の残留応力は、あまり大きくはないがすべて引張りである。

これらの結果から、疲労破面上に圧縮の残留応力が発生する条件を考えてみると、応力比が -3.0 より圧縮側にあり、かつ最小応力 $\sigma_{\min}$ が -120 MPaよりは大きいある値以上になることが必要であるように思われる。

疲労き裂進展速度 da/dN については、応力拡大係数範囲 ΔK で整理するよりは、最大応力拡大係数 $K_{\max}$ で整理する方が、データのまとまりがよく、さらに、有効応力拡大係数 K_{eff} を用いると1本のバンドの中に入ることが示された。疲労破面上の残留応力値について同様の整理を行った結果が Fig. 8, 9 である。疲労破面上の残留応力値は、もともと引張りから圧縮まで大きく変化しているので1本のバンドに入ら

Fig. 7. Residual stress on fatigue fractured surface.

Fig. 8. Residual stress on fatigue fractured surface.

Fig. 9. Residual stress on fatigue fractured surface.

ないのは当然であるが、横軸上のずれは減少する。

4 ま と め

JIS S50C材を用いて、平均応力を引張りから圧縮まで大きく変化させて、平板の引張圧縮疲労試験を行い、疲労き裂進展速度と破面上の残留応力を測定した。得られた主な結果は以下のとおりである。

(1) 疲労き裂進展速度は、応力拡大係数範囲 ΔK で整理すると、応力比の影響が大きく現れ、平均応力が引張りである実験結果は、ほぼ1本のバンドの中に入るが、圧縮平均応力を受ける実験結果は、離れた場所で広い範囲に分布する。

(2) 圧縮応力成分を無視して K_{max} で整理すれば疲

勞き裂進展速度の実験結果は、かなりよくまとまるが、バンドの幅はまだかなり広い。き裂の開閉口を考慮して、有効応力拡大係数 K_{eff} を用いると、すべての実験結果は1本のバンドの中に入る。

(3) 疲労破面上の残留応力は、応力比 R が -2.4 より圧縮側になると、き裂の進展とともに単調に変化し、引張平均応力の場合のようなピークを持たなくなる。

(4) 応力比が -3.0 より圧縮側になり、かつ圧縮の最大応力が -150 MPa 以上になる場合には、疲労破面上にかなり大きな圧縮の残留応力が発生する。

(昭和61年11月11日 第18回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 北川英夫他, 日本機械学会論文集, **41**, 22 (1975).
- 2) 平 修二, 田中啓介, 材料, **18**, 721 (1969).
- 3) S. Taira and K. Tanaka, Engg. Fract. Mech., **4**, 925 (1972).
- 4) S. Taira, *et al.*, Proc. 16th Japan Congress Mat. Res., p.77 (1973).
- 5) S. Taira and K. Tanaka, Proc. 3rd Int. Congress Fract. Munich, p.61 (1973).
- 6) S. Taira, *et al.*, Proc. 1973 Symp. Mech. Beh. Mat., p.119 (1974).
- 7) 永井 克, 北川正樹, 第20回X線材料強度に関するシンポジウム, p.46 (1983).
- 8) Maeder 私信.
- 9) 紅林 豊, 児玉昭太郎, 三沢啓志, 材料, **33**, 1039 (1984).
- 10) 関田裕次, 児玉昭太郎, 三沢啓志, 材料, **32**, 258 (1983).