クリープ-疲労相互作用のフラクトグラフィ*

小寺 沢 良 一** 岩 田 泰 男***

A Fractographic Study of Creep-Fatigue Interaction

by

Ryoichi KOTERAZAWA

(Faculty of Engineering Science, Osaka University, Toyonaka)

and Yasuo IWATA

(Toyota Motor Co., Toyota)

A fractographic study was carried out on the creep-fatigue interaction during the crack propagation process of a 304 stainless steel under repeated stress at 650°C. In general, the crack started as a transgranular fatigue crack and changed to an intergranular creep crack at a certain crack length. The transition point moved to the later stage of crack propagation as the period of repeated stress increased. This transition phenomenon could be explained by assuming that both of the crack propagation processes, the transgranular fatigue crack and the intergranular creep crack, are possible under repeated stress condition and that the one with a higher rate actually occurs. The linear fracture mechanics was applicable to explain this phenomenon in spite of the fact that the experiments were conducted under creep condition.

(Received June 19, 1975)

1 緒 言

高温で繰返し応力を負荷される場合の金属材料の破壊について論じる際には、応力の繰返しによる疲労現象とともに、クリープ現象の寄与が問題となる。フラクトグラフィに関しても引張荷重の保持時間が長いほどクリープの影響が大きく粒界クリープ破面が現われやすいことが示されている。本研究では、このような破面に現われる（換言すれば、き裂伝ば過程における）クリープ疲労相互作用を検討するため、SUS304鋼の切欠き材を用い、クリープ条件下で種々の応力変動周期（引張荷重保持時間）の片振り繰返し荷重試験および一定荷重試験を実施し、得られた破面について破面解析を行なって粒内疲労破面と粒界クリープ破面の現われ方を検討した。その結果によると一般にき裂伝ばの初期には粒内疲労破面であるが、あるき裂長さにおいて粒界クリープ破面に遷移することが観察され、また疲労き裂およびクリープき裂の伝ば速度の測定結果をもとにして、この遷移現象にはほぼ満足な説明を与えることができた。

2 実 験 方 法

供試材料はSUS304ステンレス鋼で、その化学成分と熱処理条件をTable Iに、常温での機械的性質をTable IIに示す。試験片は主として環状切欠き丸棒試験片を用い応力拡大係数の適用可能性を検討するために一部両側切欠き板試験片を用いた。いずれも同一の丸棒材から、Fig. 1に示すような形状に機械加工した。

試験機は、単一レバー式クリープ試験機を用い、タイマー、ジャッキにより重錘をかけはずして、矩形波状繰返し荷重を負荷しうるようにした。試験は一定荷重および片振り繰返し荷重（周期 $24t=25 \text{ sec} \sim 30$

Table I. Chemical composition and condition of heat treatment of the test material.

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.07	0.82	1.59	0.034	0.019	8.20	18.3	Bal.

Solution treated at 1100°C.

Table II. Mechanical properties of the test material at room temperature.

Tensile strength	62 kg/mm ²
Elongation	66%
Reduction of area	74%

* 原稿受理 昭和50年6月19日

** 正 会 員 大阪大学基礎工学部 豊中市待兼山町

*** トヨタ自動車(株) 豊田市トヨタ町

Fig. 1. Test specimen.

min, Δt = 負荷期間 = 除荷期間, 一部, 部分片振り)の下で行ない, 試験温度は, 650°C である. 破面観察は, 走査型電子顕微鏡 (日立-明石 MSM2 形) を用いて行なった.

3 実験結果

3.1 破断寿命

試験応力と破断時間の関係を Fig. 2 に示す. 繰返し荷重試験における破断時間は, 荷重の周期が充分長い場合には一定荷重試験の破断時間とほぼ等しく, 荷重の周期を短くすれば, 一般には破断時間も減少する. 荷重の繰返し速度 ν (周期 $2\Delta t$ の逆数) と破断繰返

Fig. 2. Relation between nominal stress and rupture time.

*1 片振り繰返し荷重試験の破断時間は, 試験片が破断するまでの, 荷重を負荷している正味の時間を用いた.

部分片振りの場合も応力比が小さく, 最小荷重負荷期間のクリープは無視しうるので便宜上これに準じ, 最大荷重負荷時間をとった.

し数の関係を Fig. 3 に示す. 片振り繰返し荷重試験の破断時間が, それぞれの試験応力での一定荷重試験の破断時間と等しいとき, すなわち時間依存型破壊の場合には, 実験点は同図中の破線上にのる. 図では, 荷重の繰返し速度が小さい範囲では, 時間依存型破壊の傾向を示しているが, 荷重の繰返し速度が大きくなると, しだいに繰返し数依存型破壊の傾向に移行している. (破壊が繰返し数依存型となった場合, 実験点は, 同図中で直立した直線上にのる.) また, 応力比 $R=0.30$ の場合, 同じ最大応力, 繰返し速度の $R=0.04$ の場合に比較して, 破断繰返し数は増加している.

3.2 破面観察

Fig. 4 に破面の切欠き底よりの連続写真の例を示す. 一定荷重試験による破面は, Fig. 4 (a)に示されるように本実験の範囲内では最終ディンプル破面以外の部分はすべて粒界破面 (Wedge 形) となっている. これに対し, 繰返し荷重試験による破面では, き裂が粒内を通る疲労破面領域から粒界を通るクリープ破面領域

Fig. 3. Relation between frequency of stress cycle and number of cycles to failure.

への遷移が観察され, 荷重の周期を短くすれば, 遷移点はき裂伝播過程の後期へ移行して, 粒内疲労破面領域の全破面に占める割合が増加する (Fig. 4 (c)(d)). 一般に, 疲労破面領域は平坦で, 高倍率の観察によら

Fig. 4. Examples of electron fractographs.

なくともこれを遷移後の粒界破面領域と区別することができる。荷重の周期が充分長い場合には、繰返し荷重試験でも一定荷重試験による破面と同様、最終破断部のディンプル域を除く破面全域が粒界クリーブ破面となっている (Fig. 4 (b)).

疲労破面の拡大写真例を Fig. 5 に示す。高温酸化

の影響で、やや明りょう度は欠くが、プラトーおよびストライエーションが観察され、典型的なストライエーション型疲労破面となっている。

Fig. 6 は、一定荷重試験における粒界破面と繰返し荷重試験における粒界破面の比較例である。一定荷重試験の破面のぜい性的な様相に比較して、繰返し荷重

$\sigma_{nom}=20 \text{ kg/mm}^2$,
Repeated load $2\Delta t=40 \text{ sec}$

Fig. 5. An example of enlarged view of transgranular fatigue fracture.

(a) Static load

(b) Repeated load ($2\Delta t=10 \text{ min}$)

Fig. 6. A comparison of intergranular creep fracture under constant load with that under repeated load (enlarged view).

試験の粒界面上にはディンプル模様、ストライエーション状模様などの塑性変形の跡がより多く観察される。

Fig. 7 に、破面上で遷移が起こるときの応力拡大係数値と荷重の周期の関係を示す。荷重の周期と応力比が同じであれば、負荷応力が異なってもほぼ一定の応

Fig. 7. Relation between stress intensity at the transition point from fatigue to creep fracture and period of stress cycle.

力拡大係数値で遷移が起こっている。また、応力比を $R=0.30$ で試験した場合、 $R=0.04$ の場合に比較して、低い応力拡大係数値で遷移が起こっている。

3.3 き裂伝ば速度

環状切欠き丸棒試験片については、試験を途中で中断し、繰返し荷重試験の場合は一定荷重に、一定荷重試験の場合は繰返し荷重に切り換えて破壊させ、破面から試験中断時におけるき裂長さを測定した。両側切

(a) Round bar specimen

(b) Plate specimen

Fig. 8. Crack propagation curves.

*2 破面の面積率を求めて、き裂長さを計算した。

Fig. 9. Relation between stress intensity and crack propagation rate under repeated load (including striation spacing).

欠き板試験片については、炉外から望遠顕微鏡により直接き裂の成長を観測した。き裂成長曲線を Fig. 8 に示す。

Fig. 9 は、繰返し荷重試験の 1 サイクル当たりのき裂進展量を応力拡大係数に対して整理したものである。同図中にはストライエーション間隔も併示してあるが、巨視的に測定した伝ば速度とほぼ一致している。

Fig. 10. Crack propagation rate plotted against stress intensity and net section stress.

*3 繰返し荷重試験の場合、横軸は負荷中の正味時間をとっており、単位時間当たりのき裂進展量 $(dl/dt)_f$ (mm/hr) と 1 サイクル当たりのき裂進展量 $(dl/dn)_f$ (mm/cycle) の関係は、 $(1/2)(dl/dt)_f = (dl/dn)_f \times 60 \nu$, $\nu = 1/2 \text{ dt}(\text{cpm})$ となる。また、環状切欠き丸棒試験片に対しては、破面上で遷移が起こった後の範囲については測定していない。

*4 応力拡大係数の計算は次式による。
環状切欠き丸棒試験片²⁾, $K = (P/D^{3/2})(1.72 P/d - 1.27)$, (P : 引張荷重, D : 外径, d : き裂底径)
両側切欠き板試験片²⁾,
$$K = \sigma_g \sqrt{\pi a} (1 + 0.122 \cos^4(\pi a/2b)) \sqrt{(2b/\pi a) \tan(\pi a/2b)}$$

(σ_g : gross section stress, a : き裂長さ, $2b$: 板幅。

板試験片の結果において、破面上での遷移にほぼ対応して、き裂伝ば曲線の折れ曲がり認められる。またデータは少ないが、荷重の繰返し速度を小さくした場合、伝ば速度は増加する。

単位時間当たりのき裂進展量を、正味応力および応力拡大係数によって整理した結果が Fig. 10 である。丸棒試験片と板試験片の結果を比較した場合、応力拡大係数で整理すればほぼ一致するのに対し、正味応力で整理したものは大きく相違している。このことより、クリープき裂、疲労き裂いずれの場合にも、正味応力と比較すれば、応力拡大係数の方が破壊力学的パラメータとしてより適切であると判断される。

4 実験結果の検討

4.1 き裂伝ば速度と応力拡大係数

クリープき裂の伝ば速度が応力拡大係数によって整理するという結果は Siverns⁴⁾ によっても得られている。Fig. 4 に示したように、クリープき裂の場合にも、破面は粒界型でぜい性的様相を示しており、またき裂の先端はかなり鋭くとなっていることが観察された。このことは、き裂先端での塑性変形が小さいことを示しており、その結果、伝ば速度が応力拡大係数によって整理されるものと思われる。これに関する詳しい議論は別報にゆずるが、以下き裂伝ば速度を応力拡大係数の関数として議論を進める。

4.2 疲労-クリープ遷移現象

破面観察の結果によると、繰返し荷重下では、主として応力の繰返し数に依存する疲労型き裂進展と、時間に依存するクリープ型き裂進展が生じている。ここでは、粒内疲労破面領域から粒界クリープ型破面領域への遷移が起きる条件を導くための試みとして、これら 2 種のき裂進展機構の内、き裂進展速度の大きい方が実際に起こるものとする。

粒内疲労型き裂進展は、き裂先端の開口と再鋭化により、応力の繰返しごとに行なわれるものとし、その伝ば速度を荷重の繰返し速度 ν (cpm) による効果を考慮して、

$$\begin{aligned} (dl/dn)_f &= A(\nu) (\Delta K)^{n_f} \\ &= A(\nu) (1-R)^{n_f} K_{\max}^{n_f} \text{ (mm/cycle)} \quad (1) \end{aligned}$$

$A(\nu)$: ν の関数

$R = K_{\min}/K_{\max}$, n_f : 定数

ΔK , $K_{\min}$, $K_{\max}$: 応力拡大係数の変化幅, 最小値, 最大値 (kg/mm^{3/2})

と表わす。ここで

$$A(\nu) = A_f \cdot \nu^{-1/m}, \quad A_f, m: \text{定数} \quad (2)$$

と仮定し、(1)式を

$$(dl/dn)_f = A_f \nu^{-1/m} (1-R)^{n_f} K_{\max}^{n_f} \text{ (mm/cycle)} \quad (3)$$

と表わす。

(3)式を単位時間 (hr) 当たりのき裂伝ば速度式に書き直すと、

$$(dl/dt)_f = 120 A_f \nu^{(m-1)/m} (1-R)^{n_f} K_{\max}^{n_f} \quad (\text{mm/hr}) \quad (4)$$

となる。

一方、クリープき裂進展は、応力の保持期間中に、行なわれるものとし、ここでは、近似的に一定荷重下のき裂伝ば速度に等しいものと仮定して、

$$(dl/dt)_c = A_c K_{\max} \quad (\text{mm/hr}) \quad (5)$$

と表わす。

繰返し荷重下では、疲労き裂進展とクリープき裂進展の内、き裂進展速度の大きい方が実際に起こると考えれば、粒内疲労破面から粒界クリープ破面への遷移は、Fig. 10 中の両き裂伝ば曲線の交点で生ずることになり、そのときの条件は $(dl/dt)_f = (dl/dt)_c$ によって求めることができる。(4)、(5)式を用いれば、荷重の周期を $2\Delta t$ (min)、遷移点における応力拡大係数値(最大値)を K_{tp} (kg/mm^{3/2}) として

$$2\Delta t \cdot K_{tp}^n = C \quad (6)$$

$$n = \frac{m}{m-1} (n_c - n_f)$$

$$C = \{120 A_f (1-R)^{n_f} / A_c\}^{m/(m-1)}$$

$$2\Delta t = \frac{1}{\nu}$$

が導かれる。

3・3 のき裂伝ば速度に関する実験結果より求めた A_f , n_f , m , A_c , n_c などの定数値を(6)式に代入して計算した結果を、Fig. 7 中に記入した。計算の結果は実験値に近い値を与えており、応力比を変えた場合についても実験値と対応した変化を示している。

破面観察結果においてみられたように (Fig. 6)、一定荷重下のクリープき裂進展と繰返し荷重下のそれは、詳しくみると相違しており、このことが上記の実験値と計算値の差の一因であろうと思われるが、この差は、顕著なものではなく、上述の考え方で事柄の大筋はは握できたものと考ええる。なおFig. 3 中の実線および鎖線は、繰返し荷重試験において、遷移点まで疲労き裂の伝ば速度で進展し、それ以後クリープき裂の伝ば速度で進展するものとして、き裂が伝ばするのに要する繰返し数 N_p を計算した結果であるが、実験値とよく対応している。ただし、同図中の実験点は破断繰返し数 N_f を示し一般には N_p とは異なるが、本実験の丸棒試験片では、Fig. 8 (a)にみられるようにき裂伝ば寿命 N_p が破断寿命 N_f の大部分を占めており、両者に大きな相違はないものとみられる。

上述の考え方は、疲労き裂とクリープき裂の間には遷移が起こるだけで、両者の間に大きい相互作用 (あ

るいは相乗作用) はないとするものであるから、基本的には、累積損傷説とほぼ同種の内容をもっており、その結果に大差はない。すなわち、本実験の条件の範囲のき裂進展では、累積損傷的な考え方を適用して大きい誤りはないことを意味している。

4・3 クリープ変形との関係

片振り繰返し応力下のクリープ変形に関して、さきに筆者の一人は、応力変動周期を短かくしていくと、ある周期で急激にクリープ速度が減少することを見だし、これを静クリープ-動クリープ遷移現象と名付けた。この現象は平均応力の上にあまり大きくない繰返し応力を加えたとき、クリープ変形が加速されることがあるという事実と関連しており、クリープ変形後にひき続いて起こるクリープ破壊についても、同様の事柄が知られている⁶⁾。したがって、本実験の場合にも、その影響の現われることが考えられる。しかしながら、Fig. 2 にみたように周期の減少とともに、寿命は減少する傾向にあり、上記現象からくる周期の減少に伴うクリープ速度の減少、したがって寿命の増大の傾向はみられない。同一材から採取した平滑試験片によるクリープ速度の測定結果は Fig. 11 のごとくで、静クリープ-動クリープ遷移現象すなわち、クリープ速度の減少は切欠き材の場合の試験応力に比してかなり小さい応力において生じており、(切欠き材の場合は切欠きによる応力集中のあることにも注意)、このために切欠き材ではこの遷移現象の影響が現われなかったものと考えられる。

Fig. 11. Relation between creep rate ratio and period of load cycle. Creep rate ratio is creep rate under repeated load (per unit net time under load) divided by that under constant load.

なお、平滑材の一定荷重試験における応力-最小クリープ速度線図は、Fig. 12 のごとくで、そのこう配は7.4であり、応力-クリープき裂伝ば速度線図のこう配 (7.7, Fig. 10 参照) に近い値を与えている。これは、他の報告の結果とも一致しており、クリープ速度と、クリープき裂伝ば速度の間の関連性を示唆するものとして興味深い。たとえば、クリープき裂の場合、粒界に変形が集中する点は、クリープ変形と異なっているが、その機構は同一の拡散律速機構によっている

*5 板試験片の結果より、ここでは $m=3$ として計算を行なった。

Fig. 12. Relation between nominal stress and minimum creep rate.

ことなどが考えられる。

5 結 言

SUS304 ステンレス鋼について、クリープ条件下で片振り繰返し荷重試験および一定荷重試験を実施し、フラクトグラフィおよび破壊力学による検討を行なった結果、次のような結論を得た。

(1) 片振り繰返し荷重試験の場合、破面上で、き裂伝ば過程初期の粒内疲労破面から後期の粒界クリープ破面への遷移が起こり、荷重の周期の減少に従って、遷移点は、き裂伝ば過程の後期へ移行し、疲労破面領域が増加する。

(2) 前項の遷移現象は、繰返し荷重下では、主として応力繰返し数に依存する粒内疲労き裂進展と、応力負荷時間に依存する粒界クリープき裂進展の2種の進展形式が可能で、両者の中、速度の大きい方が実際に

起こるとしてほぼ満足すべき説明ができ、また、この考え方によりき裂伝ば寿命の推定が可能である。

(3) クリープき裂伝ば速度も疲労き裂伝ば速度と同様に応力拡大係数による整理が近似的に可能である。

終わりに、本実験にご協力いただいた大阪大学基礎工学部学生（実験当時）、南坂繁、森時彦、大久保直幸の諸君に感謝の意を表する。

（昭和50年5月20日 日本材料学会第24期総会学術講演会にて講演）

参 考 文 献

- 1) Cheng, C. Y., and D. R. Diercks, Metallurg Trans., **4**, 615 (1973).
- 2) Brown, W. F., Jr., and J. E. Srawly, ASTM, STP-410, 15 (1963).
- 3) Tada, H., ほか, The Stress Analysis of Cracks Handbook Del. Research (1973).
- 4) Siverns, M. J., and A. T. Price, Int. J Fracture, **9-2**, 199 (1973).
- 5) 小寺沢良一, 材料, **24**, 1121 (1975).
- 6) James, L A, ASTM, STP-513, 218 (1972).
- 7) 小寺沢良一, 森本新一, 材料, **19**, 217 (1970), Kote-razawa, R., Proc. of Int. Conf. on Mech. Behav. of Mat, 135 (1972).
- 8) Lazau, B J, Proc ASTM, **49**, 757 (1949).