高温におけるクリープ、疲労条件下の表面き裂伝ば[†]

小寺 沢 良 一* 中 村 健 二** 藤 田 和 孝***

Propagation of Surface Cracks under Creep and Fatigue
Conditions at Elevated Temperatures

by

Ryoichi KOTERAZAWA

(Institute of Engineering Mechanics, University of Tsukuba, Ibaraki)

Kenji NAKAMURA

(Kawasaki Heavy Industries, Ltd., Akashi)

and Kazutaka FUJITA

(Ube Technical College, Ube)

Propagation of surface cracks under creep-fatigue conditions at elevated temperatures was studied with a SUS 304 steel and a 2¼Cr-1Mo steel. The shape of cracks was semi-circular in most cases and the propagation rate was the same in the surface direction as in the depth direction. The creep crack propagation rates of surface cracks under constant stresses agreed with those of through-thickness cracks in the $\dot{J}$ diagram. Microscopic fracture morphology was predominantly intergranular creep type. In the cases of repeated stresses, similarly to the case of through-thickness crack previously reported, crack propagation was controlled by ΔK in the low stress region and by $\dot{J}$ in the high stress region, microscopic fracture morphology being fatigue striation type and creep dimple type, respectively. This is true, however, only for large cracks and, in the case of small cracks, crack propagation was controlled by $\dot{J}$ even in the low stress region, microscopic fracture morphology being still fatigue striation type.

(Received Aug. 25, 1982)

キー・ワード：フラクトグラフィ、クリープ、疲労、き裂、破壊力学

1 緒 言

高温においてクリープが起る条件下のき裂伝ばの研究は、最近かなり多く行われているが、その大部分は貫通き裂に関するものであって、非貫通き裂に関する研究はほとんどない。非貫通き裂の一形態である表面き裂は実際の破壊に多くみられ、その挙動を明らかにすることは実用上重要な意味をもっている。

筆者らは、寸法の異なる貫通き裂試験片を用いて、クリープ条件下のき裂伝ばを支配する破壊力学因子を明らかにするための一連の研究を実施し、クリープが著しい条件下では修正J積分 $\dot{J}$ が支配力学因子であることを示し、これに関連する破壊機構をフラクトグラフィにより検討してきているが、ここではその一環として表面き裂について実験を行った結果を報告する。

2 試 験 方 法

供試材は SUS 304 鋼 (溶体化処理材)¹⁾⁶⁾ を主とし、一部、特に延性の低い材料の例として 2¼Cr-1Mo 鋼 (水焼入材) を用いた。試験片は板状試験片の中央片側に小孔をあけたもので、幅 12~13.3 mm、厚さ 5~6 mm、小孔直径 1 mm、深さ 1.4~1.5 mm (大きいき裂) と幅 9~12 mm、厚さ 5~6 mm、小孔直径 0.2 mm、深さ 0.2 mm (微小き裂) の 2 種を使用した。試験温度は 304 鋼については 650℃、Cr-Mo 鋼については 565℃とし、試験機は通常の単一レバー式クリープ試験機である。繰返し応力試験の場合は、ジャッキで重錘を上げ下ろしすることにより負荷している。き裂長さは、304 鋼の一定応力試験では試験片表面 (遊尺付望遠顕微鏡による) および破面上で、Cr-Mo 鋼の試験および繰返し応力試験では破面上で測定した。また、すべての試験において試験片のき裂中央開口変

[†] 原稿受理 昭和57年8月25日

* 正 会 員 筑波大学構造工学系 茨城県新治郡桜村

** 川崎重工業(株) 明石市川崎町

*** 宇部工業高等専門学校 宇部市常盤台

*1 き裂の開口が少く、試験片表面で測定困難。

位を遊尺付望遠顕微鏡により測定し、修正 J 積分の評価に用いた。

3 一定応力下のき裂伝ば

(1) 大きいき裂 304鋼の破面写真例を Fig.1 に示す。小孔付試験片に繰返し応力により予き裂を入れ、クリープき裂伝ば試験後、再び繰返し応力により破断させている。破面形状はほぼ半円形で (Fig. 1 (a)),

Fig. 1. Fracture surface of a specimen tested under a constant stress (large crack, 304 steel).

Fig. 2. $\dot{J}$ - dl/dt diagram (304 steel).

表面方向と深さ方向のき裂伝ば量はほぼ等しい。このことから、円周切欠き丸棒試験片と同様の軸対称問題とみなし、 $\dot{J} = \sigma_{net} \dot{V}$ ($\dot{V}$: き裂中央開口速度) により $\dot{J}$ を求めた。得られた $\dot{J}$ と単位負荷時間あたりのき裂伝ば速度 dl/dt の関係を Fig.2 に示す (①印)。角印で示した貫通き裂の結果とほぼ一致しており、この場合の支配力学因子が $\dot{J}$ で、これを用いることにより、

表面クリープき裂の伝ば速度を貫通クリープき裂の伝ば速度と関係づけ得ることを示している。破面の微視の様相は、貫通き裂と同様、粒界クリープ破壊である (Fig.1 (b))。

Cr-Mo 鋼の破面写真例を Fig.3 に示す。試験片表面付近でき裂伝ばの遅れが著しいが、この部分を除くと 304 鋼と同様、ほぼ半円形にき裂が伝ばしている。表面付近の遅れを考慮して、Fig.4 に模型的に示したように面積平均をとってき裂伝ば速度を求めた。これを 304鋼の場合と同様にして得た $\dot{J}$ に対して図示すると Fig.5 のようになる。この場合も、丸印で示した表面き裂の結果は角印の貫通き裂の結果のばらつきの範囲に入っており、低延性材のこの例でも $\dot{J}$ が支配力学因子とみて差支えないことを示している。なお、試験片表面付近におけるき裂伝ばの遅れは、この材料の貫通き裂の伝ばにみられるトンネル化現象と関連しているものと考えられるが、その理由は明らかでない。微視的破面様相は粒界クリープ破壊である (Fig.3)。

(2) 微小き裂 304 鋼の微小き裂試験の破面例を Fig.6, Fig.7 に示す。Fig.6 は応力の低い場合、Fig.7 は応力の高い場合の例である。応力の

低い場合には、き裂前縁にかなりの凹凸はあるが、全体的には大きいき裂の場合と同様 ほぼ半円状である (Fig.6 (a))。応力が高い場合には、き裂は表面方向に著しく長い (Fig.7 (a))。試験片表面では、Fig.6 (b), Fig.7 (b) にみられるように、主き裂以外に多くの微小き裂が発生しており、応力が高い場合にはこれが主き裂と合体して表面方向に長くなった様子がうかがわれる (Fig.7 (a))。しかし、大きいき裂と同様に求めた $\dot{J}$ と表面方向のき裂伝ば速度との関係は、Fig.2 の半黒丸のように大きいき裂の結果の延長線にあり、微小き

*2 微視組織の影響と思われる。

Fig. 3. Fracture surface of a specimen tested under a constant stress (large crack, 2-1/4Cr-1Mo steel).

Fig. 4. A schematic illustration of a surface crack of the 2-1/4Cr-1Mo steel.

Fig. 5. $\dot{J}$ - dl/dt diagram (2-1/4Cr-1Mo steel).

裂についても $\dot{J}$ が支配因子とみて差支えないことを示している。なお、この結果は大谷らによる 316 鋼の微小き裂に関する結果⁹⁾とほぼ一致している。微視的破面様相は、図にみられるように、低応力、高応力いずれも粒界クリーブ破壊である。

4 繰返し応力下のき裂伝ば

(1) 大きいき裂 304鋼の破面写真真例を Fig.8 に示す。繰返し応力は応力比 $R=0.05$ 、繰返し速度 2 cpm の矩形波片振引張り、試験中に下限応力と繰返し速度を変えて ($R=0.5$, 速度 4 cpm) ピーチ・マークを

(a) Fracture surface.

(b) Side surface.

Fig. 6. A specimen fractured under a constant stress (small crack, 304 steel, low stress $\sigma_{net}=191$ MPa).

入れた。き裂形状はこの場合もほぼ半円である。

き裂伝ば速度 da/dn を ΔK で整理した結果を Fig. 9 に、単位高応力負荷時間当りのき裂伝ば速度 da/dt を修正 J 積分 $\dot{J} = \sigma_{net} \dot{V}$ ($\dot{V}$: 単位高応力負荷時間当りのき裂開口速度) に対して図示した結果を Fig. 10 に示す。Fig. 9 において、表面き裂の伝ば速度 (○印) は、同一試験条件の貫通き裂の結果の^{5,6)} ΔK 支配域を示す実線に低伝ば速度域で収束し、この領域で ΔK が支配力学因子であることを示しており、Fig. 10 においては、これと逆に高伝ば速度域において静クリーブき裂伝ば速度を示す帯域 (○, ●, ○印) に一致し、この領域で $\dot{J}$ が支配力学因子であることを示している。一方、微視的破面様相は、Fig. 9, Fig. 10 に矢

Fig. 7. A specimen fractured under a constant stress (small crack, 304 steel, high stress $\sigma_{\text{net}}=260$ MPa).

Fig. 8. Fracture surface of a specimen tested under repeated stress (large crack, 304 steel).

Fig. 9. ΔK - da/dn diagram (304 steel).

印で示したき裂伝ば速度より低伝ば速度側ではストライエーション状模様が⁵⁾支配的で疲労破壊であることを示しており、高伝ば速度側ではディンプルが⁵⁾支配的でクリープ破壊であることを示している。また、矢印の

Fig. 10. J - da/dt diagram (repeated stress, 304 steel).

点は、Fig. 10 において実験結果 (○印) が静クリープき裂伝ば試験の結果と傾きが一致しはじめる点に対応している。これらの表面き裂伝ば挙動は、既報の貫通き裂の伝ば挙動と同様であり、クリープが起る条件下の繰返し応力下の表面き裂伝ばが貫通き裂の伝ばと同様に扱えることを示している。

(2) 微小き裂 304 鋼の破面写真例を Fig. 11 に示す。試験方法は前項と同様である。この場合も、き裂前縁形状はほぼ半円である (Fig. 11 (a))。き裂伝ば速度 da/dn を ΔK で整理した結果を Fig. 9 に示す (●印)。微小き裂の結果は他の結果が収束した伝ば速度より更に低い伝ば速度の領域にあるが、実線で示した ΔK 支配線と一致せず、これより若干高いき裂伝ば速度をもっている。微視的破面様相はストライエーション状模様が⁵⁾支配的で (Fig. 11 (b)), 前項の大きいき

Fig. 11. Fracture surface of a specimen tested under repeated stress (small crack, 304 steel).

Fig. 12. Crack opening in repeated stress tests (304 steel).

裂の ΔK 支配域と変わらない。一方、単位高応力負荷時間当りのき裂伝ば速度 da/dt を $\dot{J}$ で整理した結果 (Fig. 10 ●印) は、伝ば速度が低いにもかかわらず、大きいき裂と異り静クリープき裂の結果 (○, ●, ○印) と一致している。これはき裂が短いため小規模降伏条件が満たされないことによるものと考えられる。Fig. 12 に、上記の $\dot{J}$ に支配されている微小き裂の開口状態 (Fig. 12 (a)) を ΔK に支配されているき裂の開口状態 (Fig. 12 (b)) と比較した例を示す。 ΔK 支配のき裂の先端が閉じているのに対して、 $\dot{J}$ 支配のき裂は著しく開口していてクリープ変形が大きいことを示しており、上記の考え方を裏付けている。

5 結 論

SUS 304 鋼および一部 2¼ Cr-1Mo 鋼 (水焼入材) について、高温クリープ条件下の表面き裂伝ば挙動を通常の高いき裂および微小き裂について検討し、次の結論を得た。

- (1) き裂形状は、ほとんどの場合ほぼ半円形で、試験片表面方向と深さ方向のき裂伝ば速度はほぼ等しかった。
- (2) 一定応力下のクリープき裂伝ば速度は、修正 $\dot{J}$

積分 $\dot{J}$ で整理すると、304 鋼 (大きいき裂、微小き裂)、Cr-Mo 鋼 (大きいき裂) いずれの場合も、貫通き裂の結果とほぼ一致した。微視的破面はいずれも粒界クリープ破壊であった。

(3) 繰返し応力下の大きいき裂の伝ば速度は、既報の貫通き裂の場合と同様、低き裂伝ば速度域では ΔK 支配、高伝ば速度域では $\dot{J}$ 支配であり、微視的破面様相は、 ΔK 支配域ではストライエーション状模様 (疲労破壊)、 $\dot{J}$ 支配域ではディンプル (クリープ破壊) が支配的であった。

(4) 繰返し応力下の微小き裂の伝ばは、低伝ば速度域においても $\dot{J}$ 支配で、微視的破面様相はそれにもかかわらずストライエーション状模様 (疲労破壊) であった。これは、き裂が短いため小規模降伏条件が満たされないことによるものと考えられる。

本研究には大阪大学基礎工学部における筆者らの研究室の諸氏の協力を得た。また、試験に使用した Cr-Mo 鋼は日立造船技術研究所上田実彦氏にご提供頂いた。ここに感謝の意を表する。また、本研究には昭和 55, 56 年度文部省科学研究費 (一般研究 C) の補助を得た。付記して謝意を表する。

(昭和 57 年 6 月 27 日 第 3 回フラクトグラフィシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 小寺沢良一, 森 時彦, 材料, **26**, 948 (1977).
- 2) R. Koterazawa and T. Mori, Trans. ASME, Ser. H, **99**, 298 (1977).
- 3) 小寺沢良一, 西川義富美, 森 時彦, 材料, **27**, 92 (1978).
- 4) 小寺沢良一, 森 時彦, 材料, **27**, 1178 (1978).
- 5) 小寺沢良一, 森 時彦, 中井友充, 材料, **29**, 592 (1980).
- 6) R. Koterazawa and T. Mori, Proc. Int. Conf., "Engineering Aspects of Creep", Sheffield, p. 219 (1980).
- 7) 小寺沢良一, 森 時彦, 材料, **29**, 1135 (1980).
- 8) 大路清嗣, 小倉敬二, 久保司郎, 日本機械学会論文集, **44**, 1831 (1978).
- 9) 大谷隆一, 奥野道雄, 清水良亮, 材料, **31**, 505 (1982).