高温におけるステンレス鋼の表面き裂の疲労き裂成長特性*

結 城 良 治** 北 川 英 夫**
徐 昌 敏*** 持 田 郁 夫****

Fatigue Crack Growth of Surface Crack in Stainless Steel at Elevated Temperature

by

Ryoji YUUKI, Hideo KITAGAWA

(Institute of Industrial Science, University of Tokyo, Tokyo)

Chang-min SUH

(Gyungbuk National University, Korea)

and Ikuo MOCHIDA

(Mitsubishi Heavy Industrial Ltd., Kobe Shipyard, Kobe)

Fatigue tests were carried out on fatigue crack growth properties of small as well as large surface cracks in SUS 304 stainless steel at 538°C, by using plate specimens with surface notches of various shapes and small plate specimens with a small artificial pit. All the data of the fatigue crack growth rate obtained in the present tests were correlated with the stress intensity factor range ΔK_I , so that the applicability of linear fracture mechanics to the fatigue crack growth of surface cracks at elevated temperature was investigated and discussed in comparison with the data of through cracks at elevated temperature and those at room temperature.

It was found that the fatigue crack growth properties of surface cracks followed the same properties of through cracks even at 538°C and depended on test frequency in the same manner as through cracks. And it was observed that the fatigue crack growth properties of small surface cracks in plastic regime depended slightly on applied stress level. The data points, however, fell within a relatively narrow scatter band for a wide range of the applied stress levels and almost agreed with the data of through cracks. Therefore, under the present experimental conditions, linear fracture mechanics is to some extent applicable to the fatigue crack growth behavior of surface cracks at 538°C.

(Received Oct. 19, 1981)

キー・ワード：疲労き裂成長，表面き裂，高温，ステンレス鋼，周波数効果

1 緒 言

最近高温機器，部材の検査・保守，健全性評価にも破壊力学が拡張適用されつつあり，それに伴い高温における疲労き裂成長特性^{1)~5)}，クリープ・疲労相互作用下の時間依存性き裂成長特性^{6)~9)}に関する研究が多数報告されている。しかしその大部分の研究は貫通き裂を対象とし，その成長速度を支配する破壊力学因子 (K , ΔJ , J' など)¹⁰⁾に主眼が置かれ，実用上重要となる表面き裂および小さな表面き裂の疲労き裂成長特性に関する研究はあまり見当たらないようである。¹¹⁾¹²⁾

本研究では室温における微小表面き裂の疲労き裂成

^{13)~15)}長挙動に関する一連の研究結果を踏まえ，従来ほとんどデータの得られていなかった表面き裂および小さな表面き裂の疲労き裂成長特性を調べ，それへの破壊力学の拡張適用の可能性と問題点を検討した。

実験は SUS 304 ステンレス鋼を供試材とし，538°C 大気中で，形状の異なる表面切欠きおよび小さな人工ビットからの表面き裂の疲労き裂成長挙動を調べ，貫通き裂のデータおよび室温のデータとの比較・検討を行った。また高温における貫通き裂および表面き裂の疲労き裂成長特性の周波数依存性も調べた。

2 実験方法

供試材はオーステナイト系 ステンレス 鋼 SUS 304 鋼の溶体化処理材であり，その化学成分と機械的性質を Table I, II に示す。ただし本研究では用いる試験片に応じて組成の若干異なる三種類 (A, B, C 材とす

* 原稿受理 昭和56年10月19日

** 正 会 員 東京大学生産技術研究所 東京都港区六本木

*** 国立慶北大学校工科大学 韓国

**** 三菱重工(株)神戸造船所 神戸市兵庫区和田崎町

Table I. Chemical composition of SUS 304 stainless steel.

Material	Chemical composition, (wt. %)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
A	0.05	0.56	0.98	0.025	0.007	—	9.30	18.25
B	0.05	0.59	0.99	0.027	0.013	—	8.65	18.36
C	0.07	0.35	1.89	0.032	0.014	—	8.5	18.0

Table II. Mechanical properties of SUS 304 stainless steel.

Material	Mechanical properties					
	Temp.	Yield strength (0.2% offset)	Tensile strength	Elongation	Reduction of area	Hardness Brinell No.
	(°C)	(kg/mm ²)	(kg/mm ²)	(%)	(%)	(HB)
A	R. T.	22.4	65.0	81.8	80.5	157
	550	11.7	38.1	53.0	77.5	
B	R. T.	26.0	60.3	62.0		157
C	R. T.	32.0	66.0	57.0	72.0	179

る)の SUS 304 鋼を用いた。

本実験に用いた試験片の形状を Fig. 1 に示す。Fig. 1 の(a)は1 インチおよび1/2 インチ板厚の CT 試験片、(b)は、中央貫通切欠きおよび表面切欠きを有する平板試験片、(c)は直径 25 mm の丸棒から切出し、中央部を平板となるように加工した平滑および人工ピット付きの小型平板試験片であり、切欠きおよびピットはいずれも放電加工により入れた。なおき裂が成長する方向はすべて材料の圧延方向と直角となるように取った。

Fig. 1. Shape and size of test specimens.

疲労試験は電気油圧サーボ式疲労試験機 (MTS, 容量 10 ton) を用い、大気中で応力比 $R=0.1$ の荷重制御疲労試験を行った。荷重波形は、室温では周波数 600 ないし 400 cpm の正弦波を用い、高温では James らの試験と同じ正の鋸歯状波 (上昇時間/下降時間 = 2/4) を用い、周波数は 400 から 4 cpm まで変化した。

加熱方法は A, B 材の試験には管状電気炉を、また C 材の試験には高周波誘導加熱コイルを用い、538°C (1000°F) 一定に温度を保持した。き裂の表面長さは焦点距離を長くした移動式顕微鏡を用い、表面き裂の深さ方向の成長はビーチマーク法を用いて測定した。

3 実験結果と考察

3.1 貫通き裂の疲労き裂成長特性

基本特性データとして、室温および高温での貫通き裂の疲労き裂成長特性を調べ、Fig. 2 に示す。図中 CCT は、中央貫通き裂入り試験片 (Fig. 1 (b)) のデータである。高温のデータに着目すると、応力レベルの異なる CCT のデータおよび 1 TCT のデータとがほぼ同一特性上に集まり、538°C の高温においても疲労き裂成長速度は $4K_I$ により統一的に特性づけられることがわかる。

Fig. 2 に示した高温の結果は 400 cpm 鋸歯状波のデータであるが、さらに 538°C における疲労き裂成長特性に及ぼす周波数の影響を調べ、Fig. 3 に示した。図からわかるように周波数が小さいほどき裂成長速度は増加する傾向にあり、James の実験結果と一致した。本温度域では、クリープの影響は認められず、この周波数依存性は、酸化の影響ないし動的ひずみ時効の影響

Fig. 2. Fatigue crack growth properties of through crack at room and elevated temperature.

響によるものと考えられる。¹⁶⁾

3・2 表面き裂の疲労き裂成長特性

平板試験片中央に表面長さ ($2a$) と深さ (b) が、それぞれ 4×2 , 4×1 , 3×3 (mm) の 3 種類の表面切欠きを入れ (Fig.1 参照), 表面き裂の二次元成長挙動をビーチ・マーク法により測定した。Fig.4 に高温疲労の破断面の一例を示すが、高温でもビーチ・マークが鮮明に見える。このようなビーチ・マークから測定したき裂面形状変化を、室温、高温の場合を合せて Fig.5 に示す。いずれも表面切欠形状の異なるデータがある一定値, この場合 $b/a \approx 0.84$ に収束し, 室温と高温の場合について, き裂面形状変化の顕著な差異は認められない。

Fig.6 に室温および高温における表面き裂の最深点

Fig. 5. Change of aspect ratio for surface crack.

Fig. 6. Fatigue crack growth properties of surface crack at room and elevated temperature.

Fig. 3. Frequency effects on fatigue crack growth at elevated temperature.

Fig. 4. Fracture surface and beach marks (538°C, 400 cpm, 3×3 mm).

の成長速度 db/dN を, 最深点の ΔK で整理した結果を示す。 K の計算には最近提案された Raju-Newman¹⁷⁾ の式を用いた。 Fig.6 からわかるように室温, 高温ともに表面切欠形状の異なるデータがそれぞれ狭い分散帯内に集まり, しかも前述の貫通き裂の特性とも良く対応した。 また Fig.6 には高温 40 cpm のデータも示したが, ばらつきが大きいものの, 400 cpm のデータよりやや加速側となり, 表面き裂の場合も Fig.4 で示した貫通き裂の場合と同様な疲労き裂成長特性の周波

Fig. 7. Relations between C and m of Paris law in SUS 304 stainless steel.

数依存性が成立するものと考えられる。

以上の実験結果より、538℃における SUS 304 鋼の疲労き裂成長特性は、CT, CCT の試験片形状、応力レベル、貫通き裂と表面き裂、表面切欠形状のいかんによらず、同一周波数ではほぼ同一の特性が得られ、室温の場合と同様線形破壊力学が適用でき、Paris 則が成立することが明らかとなった。本実験で得られた室温および高温における貫通き裂と表面き裂の疲労き裂成長則 ($da/dN = C(ΔK_I)^m$) の定数 C , m を最小自乗法で求め、著者の一人が提案した手法に従いその相関性を調べ、Fig. 7 に示す。高温のデータは両対数図上で折れ曲がる場合も多く、この場合はそれぞれの $ΔK_I$ の範囲で直線近似し、 C , m を別々に求めた²⁴⁾。Fig. 7 には同一材同一実験条件の James の結果も併記した。図中に示すように室温、高温それぞれにおいて良い相関が認められた。

3・3 平滑材および人工ピット材の疲労試験結果

前節までは弾性域あるいは“大きなき裂”の疲労き裂成長特性を調べたものであるが、次に高温で特に重要な問題となる塑性域あるいは“小さなき裂”の疲労き裂成長特性についての基礎的研究を試みた。

Fig. 8 は Fig. 1 (c) に示した平滑材および小さな人工ピット材の $S-N_f$ (破断寿命) 曲線である。平滑材の疲労限は温度の上昇とともに低下するが、ピット材では逆に高温の方が疲労限が高くなる結果が得られた。

Fig. 8. $S-N$ curves for smooth and pit specimens.

すなわち、高温では切欠きからき裂が発生しにくく、き裂を発生させるためには降伏応力を超える高応力を負荷する必要がある。Fig. 8 にはピット材から発生したき裂の表面長さ $2a$ が 0.8mm, 1.0mm となる繰返し数を結んだ等き裂長曲線も併記した。この等き裂長曲線は室温、高温とも $S-N_f$ 曲線とほぼ平行となった¹⁹⁾。

この人工ピットからの表面き裂の疲労き裂成長特性を前節と同様に整理し、Fig. 9 に示す。室温の場合は、応力レベルの相違にもかかわらずほぼ同一特性となり、貫通き裂のデータとも一致しているが、高温の場合は前述のごとく高応力下の試験となるため、若干の応力レベル依存性が認められ、応力が高いほどき裂成長速度が早くなる傾向がある。しかし $σ_{max}$ を 34.7 から

Fig. 9. Fatigue crack growth properties of surface crack in pit specimens.

45 kg/mm² まで変化させても、その分散帯は比較的狭く、貫通き裂のデータともほぼ良い対応が見られる。

前述のごとく高温ではピットからき裂が発生しにくいため、別途室温でピットから疲労予き裂を発生させ、 $2a$ が約 0.85 mm になるまで成長させた後、高温疲労試験を行い、表面き裂の疲労き裂成長特性を調べ、Fig. 10 に示す。またこの試験では周波数を 400 から 4 cpm まで変化させ、周波数の影響も調べた。Fig. 10 の 400 cpm, 28 kg/mm² のデータと Fig. 9 の 36.5, 34.7 kg/mm² のデータとは、応力レベル、初期き裂の導入法の相違にもかかわらず良い対応が見られ、このような高温における高応力下の小さな表面き裂の疲労き裂成長にも線形破壊力学が拡張適用できる見通しが得られた。Fig. 10 で 40, 4 cpm のデータは、若干加速側にあり、貫通き裂の周波数依存性ほどは

Fig. 10. Fatigue crack growth properties of surface crack at elevated temperature and frequency effect. (Pit spec. Prefatigued at room temp.)

きりした傾向が見られないが, この場合も若干の周波数依存性が認められる。

Fig. 9, 10 に示した人工ピットからの表面き裂の高温における疲労き裂成長特性は, いずれも降伏応力を超える高応力下の試験結果であり, このような高応力下の疲労き裂の成長に $4K_I$ を用いるのは, 問題があるが, 今後ひずみ拡大係数 $4K_{\epsilon}$ や繰返し J 積分 $4J$ などによる整理と併せて検討したい。^{6)~8), 11), 20)}

4 結 言

SUS 304 ステンレス鋼の538℃における表面き裂および小さな人工ピットからの表面き裂の疲労き裂成長特性を調べ, 室温の場合ならびに貫通き裂の場合と比較・検討し, 以下の諸結果を得た。

(1) 538℃高温においても貫通き裂の疲労き裂成長速度は, 応力レベル, 試験片形状によらず $4K_I$ で统一的に特性づけられ, その成長特性は周波数に依存する。

(2) 表面き裂の成長挙動の測定に高温でもビーチ・マーク法が有効に利用できる。

(3) 表面切欠形状の異なる表面き裂のき裂面形状変化は, 室温の場合とはほぼ同様の挙動を示し, その最深点の成長速度は $4K_I$ で特性づけられ, 貫通き裂の特性とも一致した。

(4) 高温における表面き裂の疲労き裂成長特性にも貫通き裂の場合ほど顕著ではないが, 周波数依存性が認められた。

(5) 高温における人工ピット材の疲労限は室温のそれより高く, 高温では切欠きからき裂が発生しにくくなる。

(6) 小さな人工ピットからの表面き裂の高温における疲労き裂成長特性は, 降伏応力を超える高応力下にもかかわらず, 応力レベルの異なるデータが狭い分散帯内に入り, 貫通き裂のデータとも良く対応し, 線形破壊力学がある程度拡張適用できる見通しが得られた。

終りに本研究の疲労試験機には文部省設備費申請研究 B (54年度), 加熱装置には同科学研究費一般研究 B (55年度) の補助を受け, 記して関係各位に謝意を表する次第である。

(昭和56年10月2日 第1回破壊力学シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) McEvily, A. J., and C. H. Wells, Proc. of Int. Conf. on Creep and Fatigue in Elevated Temp., **9**, 7 (1973).
- 2) James, L. A., Int. J. Frac. Mech., **8**, 347 (1972).
- 3) James, L. A., and R. L. Knecht, Metall. Trans. A., **6A** (1975).
- 4) James, L. A., ASTM STP 513, 218 (1972).
- 5) Shahinian, P., H. H. Smith, and H. E. Watson, ASTM STP 520, 387 (1973).
- 6) Taira, S., R. Ohtani, and T. Komatsu, Trans. ASME, J. of Engng. Mat. and Tech., **101**-2, 162 (1979).
- 7) 平 修二, 大谷隆一, 北村隆行, 山田勝彦, 材料, **28**, 414 (1979).
- 8) 平 修二, 大谷隆一, 米倉隆行, 長田守弘, 北村隆行, 日本機械学会論文集, **46**, 861 (1980).
- 9) 小寺沢良一, 森 時彦, 中井友充, 材料, **29**, 592 (1980).
- 10) 大路清嗣, 小倉敬二, 久保司郎, 日本機械学会論文集, **42**, 350 (1976).
- 11) 宇佐美三郎, 福田嘉男, 志田 茂, 日本機械学会講演論文集, **810-7**, 219 (1981).
- 12) 大谷隆一, 奥野道雄, 清水良亮, 第1回破壊力学シンポジウム講演論文集, 101 (1981).
- 13) 北川英夫, 高橋 進, 日本機械学会論文集, **45**, 1289 (1979).
- 14) 北川英夫, 結城良治, 高橋 進, 徐 昌敏, 日本機械学会講演論文集, **790-9**, 25 (1979).
- 15) 北川英夫, 徐 昌敏, 日本材料学会第13回疲労シンポジウム前刷集, 10 (1979).
- 16) 平 修二, 大谷隆一, 材料の高温強度論, 205 (1980) オーム社
- 17) Raju, I. S., and J. C. Newman, Engng. Frac. Mech., **11**, 817 (1979).
- 18) 北川英夫, 日本機械学会論文集, **75**, 1068 (1972).
- 19) 北川英夫, 結城良治, 徐 昌敏, 日本材料学会第14回疲労シンポジウム前刷集, 26 (1980).
- 20) Asada, Y., R. Yuuki, and D. Sunamoto, Int. Conf. on Engng. Aspects of Creep, I Mech. E., **2**, 23 (1980).