表面き裂進展の応力繰返し速度依存性†

坂 本 英 俊* 濟 木 弘 行** 高 野 清 尊***

Effect of Stress Frequency on Surface Crack Propagation

by

Hidetoshi SAKAMOTO*, Hiroyuki SAIKI** and Kiyotaka TAKANO***

Many machine and structural materials have strain rate dependence at room temperature. In such material, fatigue strength, that is, fatigue crack initiation life and propagation rate more or less depend on stress frequency. However, in many cases, the effect of stress frequency was almost all ignored and fatigue strength was evaluated based on the results of fatigue test under a constant loading frequency. Such evaluation is likely to over/under estimate fatigue strength.

So, in strain rate dependence materials, the study made clear the effect of stress frequency on surface crack propagation by the following experiments and analysis. (1) Evaluation of strain rate dependence of material. (2) Making clear the effect of loading frequency on surface crack propagation by fatigue test and observation of fracture surface by SEM. (3) 3D-elasto/visco-plastic FEM simulation of surface crack propagation. (4) Comparison of the experimental results with the calculation ones by FEM, and establishment of an evaluation's parameter describing the effect of stress frequency on surface crack propagation.

The results obtained are summarized as follows;

(1) In strain rate dependence materials, the surface crack propagation rate and striation space depend on stress frequency.

(2) The effect of stress frequency on surface crack propagation may be explained by the equivalent elasto/visco-plastic strain range at crack front based on the visco-plasticity of the materials.

Key words: Surface crack, Stress frequency, 3D-elasto/visco-plastic analysis, Strain rate dependence, Elasto/visco-plastic strain range

1 緒 言

科学技術の進歩とともに、機械の高速、高性能化、軽量化ならびに構造物の大型化が進み、機械および構造物の破壊防止、特に疲労破壊防止は、今日、工学的に重要な問題であり、これに対する関心は、経済性あるいは信頼性の面からますます高まっている。疲労破壊に関する研究、なかでも疲労き裂発生・進展に及ぼすさまざまな因子については多くの検討がなされ、多数のデータが蓄積されている。これらの中で、従来、荷重速度効果に関しては、高温中あるいは腐食雰囲気中のものを除いて、通常の試験測定範囲では小さいとしてほとんど無視されてきた。しかしながら、最近、機械構造用材料の多様化が進み、常温での応力-ひずみ関係にひずみ速度依存性を無視しえない材料が使用されるようになっていく。

前報では、平板貫通き裂問題における疲労き裂発生寿命および疲労き裂進展速度に及ぼす応力繰返し速度の影響について明らかにした。また、繰返し速度依存

性の要因として材料の塑性域における粘性に着目した2次元弾/粘塑性解析を行なった。そして、異なる繰返し速度、変化する荷重速度点の違いおよび繰返し速度の変化の違いによるき裂進展速度、およびき裂発生寿命は、き裂先端あるいは応力集中部に生じる粘塑性ひずみ変化幅と密接な関係があることを示した。

そこで本研究では、平板貫通き裂で得られたき裂進展のより現実的な問題への適用を検討するために、三次元表面き裂のき裂進展の負荷速度依存性について検討を行なった。工業用純チタン丸棒試験片を用いて表面疲労き裂進展試験、SEMによる破面解析および3D-FEM弾/粘塑性解析による表面き裂進展シミュレーション解析を行ない、ひずみ速度依存性を有する材料の表面き裂進展則について検討した。

2 表面き裂進展試験

2・1 供試材および試験片

供試材として、常温で比較的ひずみ速度依存性の大きい工業用純チタン丸棒を用いた。供試材の化学成分

† 原稿受理 平成3年9月26日 Received Sep. 26, 1991

* 正 会 員 熊本大学工学部機械工学科 〒860 熊本市黒髪, Dept. of Mech. Eng., Kumamoto Univ., Kurokami, Kumamoto, 860

** 熊本大学工学部機械工学科 〒860 熊本市黒髪, Dept. of Mech. Eng., Kumamoto Univ., Kurokami, Kumamoto, 860

*** ヤマハ発動機(株) 〒438 磐田市新貝, Yamaha Motor Co. Ltd., Shinkai, Iwata, 438

Table I. Chemical composition (wt %).

Fe	N	O	H
0.08	0.01	0.12	0.0028

Table II. Mechanical property.

Young's modulus	Yield strength	Poisson's ratio
100 GPa	315 MPa	0.332

Fig. 1. Geometry and dimensions of specimen.

を Table I に、機械的性質を Table II に示す。また疲労き裂進展試験に用いた試験片の形状・寸法を Fig. 1 に示す。試験片にはき裂発生箇所を限定するために図に示すように中心部に直径 0.5 mm、深さ 0.5 mm の円孔を設けた。機械加工後、電気炉を用いアルゴン雰囲気中で 600°C で 1 時間 30 分保持炉冷のひずみ取り焼なましを行なった。円孔周辺部はき裂発生・進展の観察を容易にするため、エメリー紙 #1500 まで仕上げた後 0.3 μ m のアルミナペーストでバフ研磨し、鏡面に仕上げた。

2.2 実験方法

疲労き裂進展試験には電気油圧サーボ式疲労試験機（容量 10 ton）を使用した。荷重条件は片振りの引張りとし、応力繰返し速度の影響を調べるために、2 種類の繰返し速度（ $f=20$ Hz, 0.02 Hz）で疲労試験を行なった。負荷応力波は正弦波とした。実験は負荷応力振幅一定（ $\Delta\sigma=157, 176$ MPa）のもとで行ない、移動式読取顕微鏡（X50）を用い、き裂発生確認後、適当な繰返し数ごとにき裂長さを測定した。また、破断後、走査電子顕微鏡により破面を観察した。なお、試験停止等の影響を避けるためにき裂長さの測定は試験機を止めずに行ない、 $f=20$ Hz のき裂長さの測定にはストロボを同調させた。

表面き裂長さとしき裂深さの関係はき裂進展途中に繰返し速度を変化させて生じた破面のビーチマークにより測定した。

2.3 実験結果

2.3.1 単軸引張試験 き裂進展試験に先立ち供試材のひずみ速度依存性を調べるために、種々のひずみ速度下（ $\dot{\epsilon}=1.60\times 10^{-5}\sim 1.86\times 10^{-3}$ 1/s）で単軸引張試験を行なった。その結果を Fig. 2 に示す。また、疲労下における応力-ひずみ関係すなわち繰返し応力-ひずみ関係を Fig. 3 に示す。これらの図より、塑性域

Fig. 2. Monotonic stress-strain curves.

Fig. 3. Cyclic stress-strain curves.

において、単軸引張り時および繰返し負荷時の双方において、ひずみ速度の上昇とともに応力の上昇が見られ、比較的ひずみ速度が低い場合にも、粘性の影響が顕著に現れているのがわかる。また、繰返し負荷において降伏点は低下するが、ひずみ速度上昇に対する応力上昇の割合は単軸引張りのそれと比較して同程度であり、今回実験に用いた純チタンは疲労下においてもひずみ速度依存性の程度はあまり変化しないようである。

2.3.2 疲労き裂進展試験 Fig. 4 に疲労破面の

Fig. 4. Fracture surface.

Fig. 5. Relation between dl/dN and ΔK .

ビーチマークを示す。図よりキリ穴を起点としてはほぼ半円形の同心状にき裂が進展している様子がわかる。これよりアスペクト比 0.9 が得られた。

応力振幅 ($\Delta\sigma=157, 176 \text{ MPa}$) における疲労き裂進展試験によって得られたき裂進展曲線 ($l-N$) から求めたき裂進展速度 dl/dN と応力拡大係数変化幅 ΔK の関係を Fig. 5 に示す。図よりき裂進展速度に繰返し速度依存性が見られ、前報の平板の貫通き裂における進展速度と同様に、同一 ΔK 値に対して繰返し速度が低い 0.02 Hz の方が 20 Hz よりき裂進展速度が高くなっている。また、繰返し速度 f が等しい場合には、一般に整理されるように $\Delta\sigma$ が異なっても同一 ΔK 値に対してはき裂進展速度がほぼ等しいことがわかる。

2・3・3 破面観察 疲労破壊後、走査電子顕微鏡により破面観察を行なった。その一例を Fig. 6 に示す。この図は $f=20 \text{ Hz}$ における破面の SEM 写真で、疲労破面特有のストライエーションが観察された。Fig. 7 はこのストライエーション幅 s と応力拡大係数変化

Fig. 6. Example of SEM photograph of fracture surface ($f=20 \text{ Hz}$, $\Delta K=234 \text{ MPa}\sqrt{\text{mm}}$). Fig. 7. Relation between striation spacing s and ΔK .

幅 ΔK の関係を両対数で整理したものである。繰返し速度の違いによってストライエーション幅 s に着目すると、その幅は繰返し速度の低い方が広くなっており、その勾配は多少異なるが、き裂進展速度とよく対応している。

3 3D-弾/粘塑性表面き裂進展シミュレーション解析

本解析では前報と同様に、塑性域におけるひずみ速度依存性を考慮するために、構成関係に Perzyna の粘塑性理論を用い、繰返し負荷を受けて進展するき裂前縁の弾/粘塑性解析を行なった。構成関係は以下の通りである。

$$\{\dot{\epsilon}\} = \{\dot{\epsilon}^e\} + \{\dot{\epsilon}^{vp}\} \quad (1)$$

$$\{\dot{\epsilon}^e\} = [D^e]^{-1}\{\dot{\sigma}\} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}^{vp} = \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{\sqrt{J_2'}} \frac{\partial J_2'}{\partial \sigma} \quad (3)$$

式(1), 式(2), 式(3)より

$$\{\Delta \epsilon\} = [D^e]^{-1}\{\Delta \sigma\}$$

$$+ \gamma \langle \Phi(F) \rangle \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{1}{\sqrt{J_2'}} \frac{\partial J_2'}{\partial \sigma} \Delta t \quad (4)$$

ここで、 $\langle \cdot \rangle$ は時間に関する微分を示し、 γ 、 E 、 ν は粘性定数、縦弾性係数およびポアソン比である。また関数 $\langle \Phi(F) \rangle$ は次の定義による。

$$\begin{aligned} \langle \Phi(F) \rangle &= 0 & (F \leq 0) \\ \langle \Phi(F) \rangle &= \Phi(F) & (F > 0) \\ \Phi(F) &= [(\bar{\sigma} - \sigma^*) / \sigma^*]^{\delta} \end{aligned} \quad (5)$$

$\bar{\sigma}$ は相当応力、また σ^* はひずみ速度が十分小さい場合の準静的な応力-ひずみ関係から得られる応力、 γ は粘性に関する定数、 δ は材料に関する定数である。降伏判定には Mises の降伏条件を用いた。

解析に必要な材料定数は、まず Fig. 3 の繰返し応力-ひずみ関係より、ひずみ速度が最も小さい場合 ($\dot{\epsilon} = 2.47 \times 10^{-5} / \text{s}$) を準静的応力-ひずみ関係とみなして Swift の式

$$\sigma^* = 670(2.0 \times 10^{-5} + \epsilon^{\nu p})^{0.16} \text{ MPa} \quad (6)$$

を求めた。つぎに種々のひずみ速度における応力-ひずみ関係から、(4)、(5) の γ 、 δ を求め、関数 Φ を次のように決定した。

$$\dot{\epsilon}^{\nu p} = 850[(\bar{\sigma} - \sigma^*) / \sigma^*]^{8.0} \quad (7)$$

Fig. 3 の実線は上式を用いて実験結果をシミュレーションしたものである。実際の材料のひずみ速度依存性がよく近似されていることがわかる。

粘塑性計算を行なう際の増分計算の方法および有限要素法によるき裂進展シミュレーション解析は前報の場合と同様である。解析に用いた要素分割形状およびき裂進展面の断面分割形状を Fig. 8(a), (b) に示す。対称性を利用して解析は 1/4 領域に対して行なった。き裂前縁形状は実験より得られたピーチマークをもとに半だ円形として近似した。き裂前縁近傍の最小要素は一辺が 0.2 mm の立方体とした。要素としては 8 節点複合要素を用い、要素の方向性を抑えた。要素数は 630、節点数は 832 である。

また、疲労き裂進展試験における負荷応力波形は正弦波であるが、解析では、計算時間を考慮して応力波

Fig. 8. Finite element subdivision.

を矩形波で近似した。

4 解析結果および考察

Fig. 9 に解析より得られた繰返し速度 $f = 20 \text{ Hz}$ と 0.02 Hz の場合のき裂進展にともなう開口変位の変化を示す。上の図は荷重上限 ($\sigma / \sigma_{\max} = 1$)、下の図は荷重下限 ($\sigma / \sigma_{\max} = 0$) の場合を示す。いずれの場合

Fig. 9. Variation of COD.

Fig. 10. Relation between $\Delta \epsilon^{\nu p}$ and ΔK .

Fig. 11. Relation between dl/dN and $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$.

もき裂進展にともない開口変位は増加している。繰返し速度の違いに着目すると $f=0.02$ Hz の方が 20 Hz の場合よりき裂の開口が荷重上限・下限とも大きく、このことは実験より得られたき裂進展速度の大小とよく対応している。

Fig. 10 はき裂先端中央部の要素の相当粘塑性ひずみ変化幅 $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$ と ΔK の関係を示す。図より $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$ - ΔK の関係は両対数グラフ上ではほぼ直線となる。同一 ΔK 値に対してみると、繰返し速度の小さい $f=0.02$ Hz の方がき裂先端の相当粘塑性ひずみ変化 $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$ が大きくなっている。すなわち、材料の受ける損傷は f が低い方が大きくなっている。この傾向は繰返し速度が低い方がき裂進展速度が大きいという実験結果と良く対応している。これらの対応はき裂進展速度 dl/dN に及ぼす応力繰返し速度の影響を、き裂前縁における相当粘塑性ひずみ変化幅 $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$ で整理できることを示唆している。

Fig. 11 は、Fig. 15 と Fig. 10 の対応関係に基づき、実験より得られたき裂進展速度 dl/dN を解析によって得られたき裂先端の相当粘塑性ひずみ幅 $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$ で両対数グラフ上に整理したものである。図より、 dl/dN を $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$ で整理すると、両者の関係は、応力繰返し速度および応力振幅に関わらず、両対数グラフではほぼ一本の直線で表わされることがわかる。

したがって、工業用純チタンの表面き裂進展速度に及ぼす応力繰返し速度の影響は、前報の平板の貫通き裂問題同様に、材料の粘塑性に基づいたき裂先端における相当粘塑性ひずみ変化幅 $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$ で説明できると考えられる。

5 結 言

顕著なひずみ速度依存性を有する工業用純チタン丸棒を用いて疲労き裂進展試験を 2 種類の応力繰返し速度で行ない、表面き裂の進展速度を測定した。また、三次元に拡張された弾/粘塑性有限要素解析コードを用いて、き裂進展シミュレーション計算を行ない、表面き裂進展の繰返し速度依存性を考察した。以下に結論を示す。

(1) 繰返し速度の違いによる表面き裂進展速度および破面より観察されるストライエーション幅の相違が認められ、繰返し速度 f の小さい方が、き裂進展速度 dl/dN 並びにストライエーション幅は大きくなる。また、き裂進展速度 dl/dN を応力拡大係数 ΔK で整理すると、応力振幅によらず、同一 f では両対数グラフでほぼ 1 本の直線となる。

(2) FEM 解析の結果、進展するき裂の開口変位およびき裂前縁の相当粘塑性ひずみ変化幅は、繰返し速度が小さい方が大きくなり、実験のき裂進展速度の傾向とよく対応している。き裂進展速度を粘塑性ひずみ幅で整理すると両対数ではほぼ 1 本の直線となる。

(3) 表面き裂進展に及ぼす繰返し速度の影響は、材料の粘塑性に基づくき裂前縁の相当粘塑性ひずみ変化幅 $\Delta \bar{\epsilon}^{vp}$ で説明される。

(平成 2 年 11 月 28 日 日本機械学会材料力学講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 竹園茂男, 坂本英俊, 福岡国広, 材料, **33**, 1052 (1984).
- 2) 坂本英俊, 竹園茂男, 西村明洋, 洲上真帆, 材料, **37**, 798 (1989).
- 3) H. Sakamoto, S. Takezono, Engng. Frac. Mech., **31**, 463 (1989).
- 4) 竹園茂男, 日本機械学会講演論文集, No. 903-1, 124 (1990).
- 5) H. Sakamoto and S. Takezono, Engng. Frac. Mech., **33**, 463 (1990).
- 6) P. Perzyna, Advances in App. Mech., **9**, 243 (1966).