209 混合モード条件下の不連続変位分布と屈折疲労き裂伝ば挙動の相関

Relationship between Discontinuous Displacement along Crack and Bending Fatigue Crack Propagation Behavior under Mixed-Mode Condition

○ 濱田 敦司 (岡山大院) 正 鳥居 太始之 (岡山大) 正 清水 憲一 (岡山大)

Atsushi HAMADA, Graduate Student, Okayama University, 3-1-1, Tsushima-naka, Okayama

Tashiyuki TORII and Kenichi SHIMIZU, Faculty of Engineering, Okayama University

1. 緒言

機械や構造物中のき裂は様々な方向の負荷応力を受け混合モード条件下にある場合が多く、屈折疲労き裂の発生および伝ば挙動について検討する必要がある。一般にき裂の評価には応力拡大係数 K が用いられるが、混合モード条件下の屈折疲労き裂の応力拡大係数を正確に求めることは困難な場合が多い。そこで、本研究では斜め予き裂からの屈折疲労き裂の発生および伝ば挙動を観察し、予き裂および屈折き裂に沿う不連続変位分布を測定した。そして得られた不連続変位分布から応力拡大係数を評価し、屈折疲労き裂の伝ば挙動について検討した。

2. 実験方法

2.1 予き裂試験片

供試材は S45C 材を用いた。斜め予き裂の作製方法は前報⁽¹⁾と同様である。試験片は図 1 に示すような中央の直径 $\phi=1\text{mm}$ の切欠き穴から発生した長さ $a=3\text{mm}$ の斜め予き裂を有する矩形形状である。電気油圧サーボ式試験機を用いて繰返し速度 20Hz、最大応力 $\sigma_{\max}=140\text{MPa}$ 、き裂発生まで応力比 $R=-1$ 、発生後は $R=0$ でき裂を進展させた斜め予き裂試験片と応力比 $R=-1$ のままき裂を進展させた試験片を作製した。この時 $R=-1$ の方が $R=0$ よりも屈曲の大きな斜め予き裂となる。斜め予き裂の傾き角 β は 45deg とした。そして、予き裂上に圧縮残留応力を有する疲労予き裂材と、真空炉中で $873\text{K}\cdot 1\text{h}$ 保持の低温焼なましを行い、残留応力を除去した焼なまし予き裂材とを用意した。

Fig.1 Dimension of specimen with a slant crack

2.2 不連続変位分布の測定

き裂を中心にはさみ、かつ直交するように $60\mu\text{m}$ の間隔でマイクロビッカース圧痕を打ち、負荷時と除荷時の相対的な変位量の差を画像処理システムにより測定し、それらを幾何学的な関係により不連続変位分布 U (モード II)、 V (モード I) を求めた⁽¹⁾。測定は予き裂上ではき裂に沿って $100\mu\text{m}$ 間隔、屈折疲労き裂上では $25\mu\text{m}$ 間隔で行った。

2.3 屈折角度の測定

屈折疲労き裂は、繰返し速度 20Hz、 $\sigma_{\max}=120\text{MPa}$ 、応力比 $R=0$ でき裂を進展させた。屈折角度 θ は、図 2 に示すように予き裂先端を A、予き裂上の任意の点を B、屈折疲労き裂先端を C とし、線分 AB、BC、CA の三角形に対する余弦定理を適用し求めた。なお、線分 CA の長さを屈折疲労き裂長さ a' とする。

Fig.2 A method of measurement for fracture angle

3. 実験結果および考察

3.1 予き裂の不連続変位分布

図 3 に応力比 $R=-1$ で作製した斜め予き裂から屈折疲労き裂が発生した直後の不連続変位分布を示す。なお図中の実線は、無限板中斜めき裂における不連続変位分布の理論値⁽¹⁾であり $\beta=45^\circ$ の場合、 $U/2=V/2$ となる。図 3 の (a) と (b) を比較すると、疲労予き裂材の方が焼なまし予き裂材より開口量 $V/2$ が小さい。これは圧縮残留応力の影響によるものと考えられる。

Fig.3 Discontinuous displacements along precrack ($R=-1$)

3.2 屈折疲労き裂の伝ば曲線

屈折疲労き裂の長さ a' と繰返し数 N の関係を示す図 4 において、応力比 $R=0$ で作製した斜め予き裂より発生した屈折疲

Fig.4 Bending fatigue crack propagation curves

疲労き裂の場合、予き裂上に圧縮残留応力が存在する疲労予き裂材の方が焼なまし予き裂材よりも伝ばが遅いことがわかる。また、応力比 $R=-1$ で作製した斜め予き裂材の場合も、圧縮残留応力を有する疲労予き裂材の方が屈折疲労き裂の伝ばが遅くなっているが、約 $a'=0.15\text{mm}$ 以上では焼なまし予き裂材とほぼ同様の速さでき裂が伝ばしていることがわかる。

3.3 屈折角度

図5に屈折疲労き裂伝ばに伴う屈折角度 θ の変化を示す。応力比 $R=0$ で作製した斜め予き裂から発生した屈折疲労き裂の場合、疲労予き裂材、焼なまし予き裂材ともに屈折角度は $\theta=50\sim 55\text{deg}$ である。これに対して応力比 $R=-1$ で作製した斜め予き裂の場合、焼なまし予き裂材では、応力比 $R=0$ で作製した斜め予き裂の場合とほぼ同様の屈折角度を示すが、疲労予き裂材の場合、 $\theta=60\sim 65\text{deg}$ となり、屈折角度が大きいことがわかる。

Fig.5 Variation of fracture angle with bending fatigue crack propagation

3.4 屈折疲労き裂の不連続変位分布

屈折疲労き裂長さが約 $a'=1.0\text{mm}$ に達したときの斜め予き裂および屈折き裂に沿う不連続変位分布を図6に示す。(a)は応力比 $R=0$ で作製した斜め予き裂、(b)は $R=-1$ で作製した斜め予き裂の場合で、いずれも疲労予き裂材である。応力比 $R=-1$ で作製した斜め予き裂の場合の方が $R=0$ よりも屈折疲労き裂部の開口量、すべり量ともに大きいことがわかる。なお、(b)の $R=-1$ で作製した斜め予き裂の場合に、屈折疲労き裂部のすべり量が大きくなっているが、これは屈折角度 θ が大きいことに関係していると考えられる。

Fig.6 Discontinuous displacements along bent crack

3.5 屈折疲労き裂の応力拡大係数

図6の不連続変位分布 U, V を式(1)に代入し、変位外挿法により応力拡大係数 $(K_I)_{est}$ 、 $(K_{II})_{est}$ を算出した。

$$\begin{cases} (K_I)_{est} \\ (K_{II})_{est} \end{cases} = \frac{E}{4} \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} \begin{Bmatrix} U/2 \\ V/2 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

なお r は屈折疲労き裂先端からの距離、 E は縦弾性係数 (206GPa) である。また、屈折疲労き裂が $a'=0.1\text{mm}$ 以下の場合、著者らが提案した仮想直線き裂上に変換した不連続変位分布を用いた⁽²⁾。

疲労予き裂から発生した屈折疲労き裂の伝ばに伴う応力拡大係数 $(K_I)_{est}$ および $(K_{II})_{est}$ の変化を示す図7において、応力比 $R=-1$ で作製した斜め予き裂から発生した屈折疲労き裂の方が、 $R=0$ で作製した斜め予き裂材の場合よりも $(K_I)_{est}$ の値が大きいことがわかる。これに対して $(K_{II})_{est}$ の値は応力比 $R=0, -1$ の場合とも、屈折疲労き裂発生後 $a'=0.3\text{mm}\sim 0.5\text{mm}$ でほぼ零である。なお、焼なまし予き裂材の場合も、ほぼ同様の結果を示した。

著者らは混合モード条件下の屈折疲労き裂伝ばに対して式(2)で求められる応力拡大係数 $(K_M)_{est}$ を用いた整理が有効であることを報告した⁽³⁾。

$$(K_M)_{est} = \left[K_I^4 + 8K_{II}^4 - \frac{2 \cdot K_I^4 \cdot 8K_{II}^4}{\{(K_I^4)^2 + (8K_{II}^4)^2\}^{1/2} + K_I^4 + 8K_{II}^4} \right]^{1/4} \quad (2)$$

図8に屈折疲労き裂の伝ば速度 da'/dN を $(K_M)_{est}$ で整理した結果を示す。斜め予き裂部の圧縮残留応力の有無、屈曲の大きさの違いによらず、屈折疲労き裂の伝ば速度が $(K_M)_{est}$ を用いて整理できることがわかる。

Fig.7 Variation of stress intensity factors with bending fatigue crack propagation

Fig.8 Relationship between fatigue crack propagation rate and the stress intensity factor, $(K_M)_{est}$

参考文献

- (1)鳥居・本田・吉村，機論，58-552，A(1992)，1361-1367。
- (2)鳥居・本田，材料，42-476(1993)，568-573。
- (3)鳥居・戸井・田村，機論，62-601，A(1996)，2008-2014。