703 有限要素法を用いた残留応力場における三次元斜め疲労き裂の 伝ばシミュレーションおよびその実験的検証

Finite Element Simulations and Experiments on Propagation of Three-Dimensional Slant Fatigue Cracks in Residual Stress Fields.

○ 学 山本 智彦 (阪大院)
正 久保 司郎 (阪大工)

正 辻 昌宏 (阪大工)
学 徳増 裕之 (阪大工)

Tomohiko YAMAMOTO, Masahiro TSUJI, Shiro KUBO, and Hiroyuki TOKUMASU
Osaka University, 2-1 Yamadaoka, Suita, Osaka

The present authors proposed a method for predicting fatigue lives of a two-dimensional crack propagation in residual stress fields, by using crack propagation behavior expressed in terms of effective stress intensity range, and effective range ratio U expressed in terms of stress ratio. Extensions of the method to three-dimensional cracks have been made. In this paper, the method was applied to three-dimensional slant cracks, slant hole-corner cracks and slant corner crack propagating toward a hole using the finite element method. The amount and direction of crack extension were evaluated at each point of the crack front to simulate complex shape changes in the three-dimensional cracks. The effects of contact restraining stresses were examined based on predictions using the finite element simulations and their comparison with experiments.

Key Words : Simulation, Fatigue Crack Propagation, Three-Dimensional Crack, Slant Crack, Hole, Finite Element Method, Fatigue Life Prediction, Residual Stress

1 緒言

実際の構造物に存在するき裂は斜めき裂⁽¹⁾のような場合や残留応力が存在する場合など、より複雑な条件下にある。そこで本報告では、実際の見地から、残留応力場における斜め隅き裂およびボルトやリベット等で円孔を締結した場合に、その円孔縁から生じる隅き裂、さらには円孔に向かい伝ばする斜め隅き裂に対して、有限要素法を用いて三次元疲労き裂伝ばシミュレーションを行い、実験結果と比較することにより、それらのき裂の伝ば挙動を調べる。

2 解析対象および解析方法

本報告では、Fig.1に示す3種類の斜めき裂を解析対象とした。繰返し荷重による軸方向引張り応力および締結による板厚方向圧縮残留応力を等価節点力による表面力として三次元有限要素法に組み込み弾性解析を行い、応力拡大係数の最大値 K_{max} 、最小値 K_{min} を、き裂前縁各点で評価した。この K_{max} 、 K_{min} に、き裂前縁各点で大略らの寿命推定法⁽²⁾を適用し、き裂伝ば量を算出した。き裂伝ば方向を決定するクライテリオンとしては $\Delta \sigma_\theta$ 最大説⁽³⁾を用いた。

3 推定結果

3.1 斜め隅き裂に対するシミュレーションおよび実験結果

Fig.1(a)に示したように、き裂がき裂深さ方向(Z 方向)に対する角度を θ_z 、表面方向(X 方向)に対する角度を θ_x で表す。材料としては PMMA 材を用いた。解析対象の寸法は、 $W:t:h=1:1:5$ で $t=15(\text{mm})$ 、初期き裂寸法は、き裂深さを a 、き裂表面長さを c とすると、 $a/t=c/t=0.13$ である。荷重条件は応力範囲 $\Delta \sigma=8.7(\text{MPa})$ 、応力比 $R=0$ とした。1回の計算で伝ばさせるき裂深さ Δa は $0.5(\text{mm})$ とした。

$\theta_z=0^\circ$ 、 $\theta_x=30^\circ$ の場合について、き裂伝ばシミュレーションを行った。解析から得られた表面(X 方向)および深さ(Z 方向)へのき裂伝ば経路と、同じ条件で行った実験結果との比較を Fig.2 に示す。表面(X 方向)では実験においてはき裂が下方へ伝ばする傾向がみられ、解析でも若干その傾向が認められる。深さ(Z 方向)においては実験が若干上方へ伝ばしているのに対し、解析では下方に伝ばする傾向が認められる。

Fig.1 Models used for analysis

Fig.2 Predicted and experimental crack propagating paths for slant corner crack with $\theta_z=0^\circ$, $\theta_x=30^\circ$

Fig.3 Predicted and experimental crack propagating paths for slant corner crack with $\theta = 30^\circ$, $\theta_s = 30^\circ$

Fig.3 に、深さ(Z)方向にも $\theta = 30^\circ$ の角度をもつき裂に対して得られたき裂伝ば経路の推定結果を示す。Fig.2 と同様に、表面(X)方向、深さ(Z)方向ともにき裂が若干下方へ伝ばする傾向が認められる。一方実験においては、表面(X)方向、深さ(Z)方向ともにき裂が水平に伝ばし下方に伝ばする傾向は認められなかった。これは実験における初期切欠き形状の精度が低かったためと思われる。

3.2 円孔に向かい伝ばする斜め隅き裂に対するシミュレーション

Fig.1(b)に示した解析対象に対してき裂の伝ばシミュレーションを行った。き裂は円孔に向かい伝ばする。また円孔が存在しない場合との比較も行った。材料としてはSM41B 鋼を想定した。解析対象の寸法は、 $W:t:h=2:1:4$ 、 $t=10$ (mm)、円孔の半径 $R=5$ (mm) とし、初期き裂寸法は、き裂の深さを a 、き裂表面長さを c とすると、 $a/t=0.2$ 、 $c/t=0.133$ である。荷重条件は応力範囲 $\Delta\sigma=150$ (MPa)、応力比 $R=0$ とする。円孔を締結する場合の接触圧縮応力は $\sigma_c=300$ (MPa) とする。接触圧縮応力は、円孔の中心からの距離を r とすると、 $r \leq 10.85$ (mm) の面に作用する。

Fig.4(a)および(b)に、円孔が存在する場合と存在しない場合について、解析により得られたき裂伝ば経路をそれぞれ示す。いずれの伝ば経路も若干下方に向く傾向が認められる。円孔が存在する場合の方が、円孔が存在しない場合と比較して表面(X)方向の伝ば量が大きくなっていることがわかる。

Fig.4 Predicted crack propagating paths for slant crack in a specimen with and without hole

Fig.5 Predicted crack propagating paths for hole-slant crack with and without contact restraining stresses

3.3 円孔縁から生じた斜めき裂に対するシミュレーション

Fig.1(c)に示す解析対象に対して、円孔をボルトあるいはリベット等で締結し、試験片の厚さ方向に圧縮荷重を加えた場合を想定し、円孔の縁から生じる斜め隅き裂の伝ばシミュレーションを行った。また締結による圧縮力が存在しない場合との比較も行った。材料としてはSM41B 鋼を想定した。解析対象の寸法は、 $W:t:h=2:1:4$ 、 $t=10$ (mm)、円孔の半径 $R=5.25$ (mm) とし、初期き裂寸法は、き裂の深さを a 、き裂表面長さを c とすると、 $a/t=0.2$ 、 $c/t=0.133$ である。荷重条件は応力範囲 $\Delta\sigma=150$ (MPa)、応力比 $R=0$ とする。円孔を締結する場合の接触圧縮応力は $\sigma_c=300$ (MPa) とする。接触圧縮応力は、円孔の中心からの距離を r とすると、 $r \leq 10.85$ (mm) の面に作用する。

Fig.5に解析から得られた接触圧縮応力が存在する場合と存在しない場合のき裂伝ば経路を示す。斜め隅き裂(Fig.1(a)および(b))と同様に、伝ば初期にき裂が下方に伝ばする傾向が認められた。また締結を行った場合は行わなかった場合と比べて、深さ方向と表面方向との中間付近の伝ば量が比較的小さくなる傾向が認められた。

4 結言

本研究では、斜め隅き裂、円孔に向かい伝ばする斜めき裂および円孔縁から生じる隅き裂について、有限要素法を用いてき裂伝ば挙動を調べ、実験結果と比較検討した。得られた結果をまとめて以下に示す。

1. 斜め隅き裂の解析においては、若干下方に伝ばする傾向が認められたが、実験でも同じ傾向が認められた。深さ方向にも角度をもつき裂においても同様の傾向が認められた。
2. 円孔に向かい伝ばする斜め隅き裂においては、円孔がない場合と比較して、円孔が存在する場合の方が表面方向の伝ば量が大きくなった。
3. 円孔縁から生じた斜めき裂においては、斜め隅き裂と同様に下方に伝ばする傾向が認められたが、締結を行った場合は行わなかった場合と比較して、深さ方向と表面方向との中間付近の伝ば量が小さくなる傾向が認められた。

本研究は、文部科学省科学研究費補助金基盤研究(C)の援助を得て行われたものである。記して謝意を表す。

参考文献

- [1] Yaoming Mi, *Three-Dimensional Analysis of Crack Growth*, Computational Mechanics Publications, 1996
- [2] 大路・ほか4名, 機論, A53-492 (1987), 1516
- [3] 大路・ほか5名, 機論, A59-562 (1993), 1429