

105 単一大荷重負荷後における 遅れ繰返し数に及ぼす試験片厚さの影響

Effect of specimen thickness on the Number of Delay Cycles after an Overload

○学 石坂祐輔* (富山大・院), 正 石原外美* (富山大), 正 五嶋孝仁* (富山大)

*Department of Mechanical Engineering, Toyama University, Gofuku3190, Toyama 930-8555, Japan

Key Words: Fatigue crack, Crack closure, Aluminum alloy, Overload, Residual stress.

1. 緒言

機械・構造物の受ける荷重は,そのほとんどが変動荷重である.信頼性の高い疲労設計法を得るために変動荷重下での研究が多くなされている.大荷重を負荷することによってき裂進展速度の遅延現象が生じることが知られている.また,大荷重後の遅延は,試験片表面のき裂閉口現象に支配されていることが明らかにされている.大荷重の負荷により,試験片表面近傍に生じる圧縮残留応力は試験片厚さの影響を受ける.そして,疲労き裂閉口挙動,並びに遅れ繰返し数 N_d も変化することが,複数の研究者によって調査され,試験片厚さと負荷応力比が大荷重負荷後のき裂閉口挙動と遅れ繰返し数 N_d に及ぼす影響について報告されている.

本研究では,試験片厚さと負荷応力比がき裂閉口挙動と遅れ繰返し数 N_d に及ぼす影響を調査することを目的とする.

2. 試験片および実験方法

2.1 試験片 実験で用いた試験片の材料はアルミニウム合金6061-T6である.その機械的性質は降伏応力276 MPa,引張強さ311 MPa,伸び12%である.試験片形状は,幅76.50 mm,高さ68.70 mm,厚さ6 mmのコンパクトテンション試験片である.また,き裂の観察を容易にするため,試験片表面をエメリー紙とダイヤモンドペーストを用いて鏡面に仕上げた.

2.2 実験方法 本実験で用いた試験機は電気・油圧サーボ型疲労試験機であり,応力繰返し速度 10 Hz,正弦波形のもとで片振り疲労試験を行った.応力比 $R=0.1\sim 0.8$ の種々の応力比のもとで,大荷重を負荷後のき裂進展特性を調査した.き裂進展実験は応力拡大係数幅 ΔK が一定のもとで行った.レプリカ法を用いて,疲労き裂長さを測定した.き裂先端付近にひずみゲージを貼り,弾性コンプライアンス法と引き算回路を用いることにより,き裂閉口点の調査をした.

本実験で用いた大荷重の定義を式(1)に示す.ここで, K_{maxOL} は大荷重を負荷時の最大応力拡大係数, $K_{max,b}$,並びに $K_{min,b}$ は ΔK =一定振幅下での最大,並びに最小の応力拡大係数である.式(1)からわかるように,%大荷重は ΔK で定義されている.式(2)は遅れ繰返し数 N_d の定義である.大荷重負荷後,き裂進展速度が定常状態に戻るまでの距離を r_p とする.遅れ繰返し数 N_d は,大荷重を負荷後,き裂が r_p を抜出すために必要な繰返し数 N_{total} と,大荷重を負荷しない場合にき裂が r_p を抜出すのに必要な繰返し数 N_0 の差として求められる.

$$\%Overload = \frac{K_{maxOL} - K_{min,b}}{K_{max,b} - K_{min,b}} \times 100 \quad (1)$$

$$N_d = N_{total} - N_0 \quad (2)$$

3. 実験結果

一定振幅荷重下での ΔK_{eff} とき裂進展速度 da/dN の関係は

両対数グラフ上で直線近似できることから,式(3)で表される.ここで ΔK_{eff} は有効応力拡大係数幅である.また A と $\Delta K_{eff,th}$ は材料定数である,

Fig.1は一定振幅荷重下における ΔK_{eff} とき裂進展速度の関係を両対数グラフ上に整理したものである.き裂進展速度は K_{op} に影響を受けていることが分かる. Fig.2は大荷重負荷後のものである.図中の直線は一定振幅下におけるき裂進展特性を示したものである.図より大荷重負荷後のき裂進展特性も,一定振幅下の特性と同様の関係で与えられることから,大荷重負荷後のき裂進展速度は,き裂の開閉口挙動を考慮して予測できることを示している.

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K_{eff} - \Delta K_{eff,th})^2 \quad (3)$$

$$A = 1.05 \times 10^{-9} \quad \Delta K_{eff,th} = 0.85 MPa\sqrt{m}$$

$$\Delta K_{eff} = K_{max,b} - K_{op} \quad (4)$$

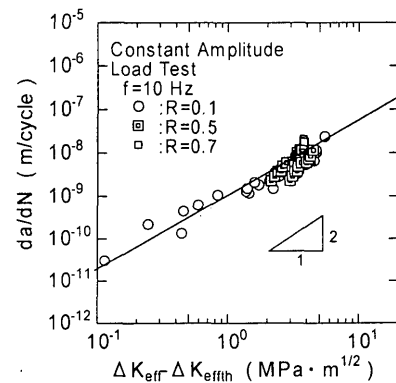


Fig.1 Effective range of the stress intensity factor versus Crack growth rate under constant amplitude loading

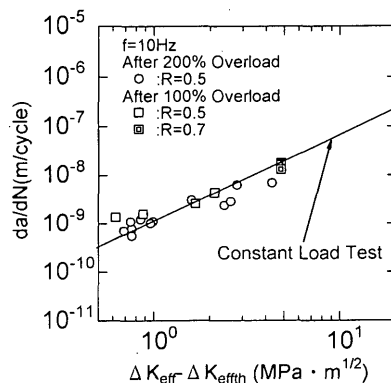


Fig.2 Effective range of the stress intensity factor versus Crack growth rate following an Overload

4. 有限要素法による大荷重負荷後のき裂進展解析

4.1 解析方法 汎用有限要素プログラム MENTAT/MARC を用い、対象性を考慮して CT 試験片を厚さ方向、高さ方向に 1/2 として 1/4 モデルに置き換えて 3 次元のき裂進展解析を行った。Fig. 3 は解析で用いたメッシュを示したものである。初期き裂長さを 18.75 mm とし、き裂の先端から左端までを y 方向に、試験片厚さ方向の中心を z 方向に拘束し、三角波の荷重を負荷し解析を行った。

4.2 き裂進展シミュレーション法

有限要素解析におけるき裂閉口点の求め方とき裂の進展シミュレーション法として次の方法を用いた。まず、 $K=K_{max}$ まで負荷し、き裂先端の y 方向の拘束を開放し、き裂を 1 メッシュ分だけ進展させた。その後荷重を $K=K_{min}$ まで徐々に除荷した。その途上でき裂先端部後方の塑性ストレッチの高さとき裂の開口変位が等しくなる点が観察できる。この点をき裂が閉口した時点と定義し、 K_{op} を定めた。これを式(4)に代入することで ΔK_{eff} を求め、さらに式(3)のき裂進展則に代入することによって da/dN がわかる。つまり 1 メッシュ分だけき裂を進展させるのに必要な繰返し数が得られる。

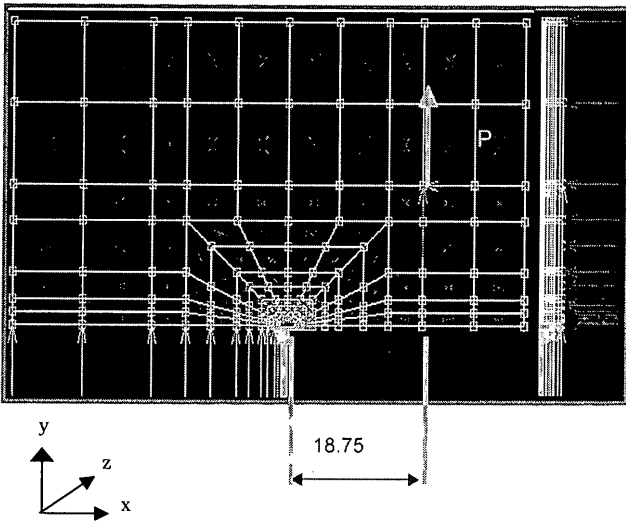


Fig.3 Finite element mesh of the investigated CT specimen

4.3 計算結果 Fig. 4 は $R=0.5$, 100% 大荷重を負荷した場合の遅れ繰返し数 N_d と応力比 R の関係を示したものである。試験片厚さ $B=0.5, 3, 6$ mm の場合についての解析結果を示した。なお図中には $B=6$ mm に対する実験結果が併せてプロットしてある。図から分かるように試験片厚さが 0.5 mm の場合には大荷重の負荷によりき裂進展は停止する。一方 3 mm の場合にも 6 mm のときと比べ N_d は大きくなっている。

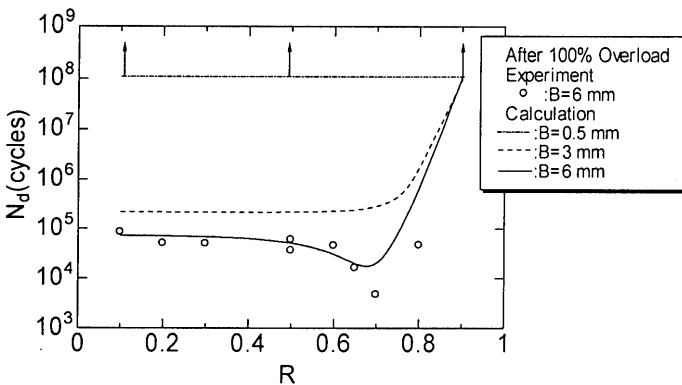


Fig.4 Number of delay cycles versus Stress ratio

5. 考察

遅れ繰返し数に及ぼす試験片厚さの影響を考察するために、大荷重負荷による試験片内部方向への残留応力について検討する。

Fig. 5 は $R=0.5$, 100% 大荷重負荷後の試験片内部方向にかかる y 方向の圧縮残留応力分布を示したものである。ただし、横軸は試験片厚さ z を試験片の半幅で無次元化したものである。図から分かるように、試験片厚さが薄くなる程、試験片厚さに対して圧縮残留応力領域が占める割合が大きくなる。以上より、試験片厚さが薄くなるにつれ、圧縮残留応力によるクランプ力が増大し、その結果 K_{op} が増加し遅れ繰返し数が増加するものと考えられる。

Fig. 6 は試験片内部にかかる残留応力分布を模式的に示したものである。図に示すように大荷重負荷により、表面部に生じる圧縮残留応力がクランプ力となり、き裂開口を妨げる。その結果 K_{op} が増加し、遅れ繰返し数 N_d が増加する。これは薄い試験片において顕著となる。

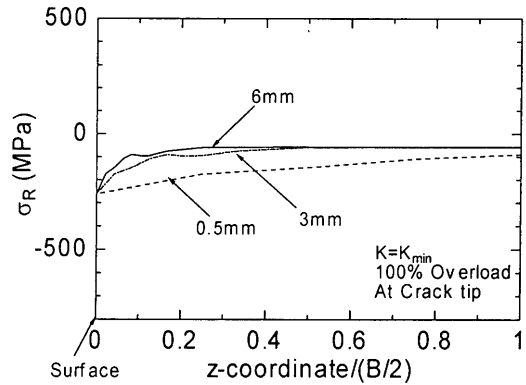


Fig.5 Mean compressive residual stress versus effective range of residual stress

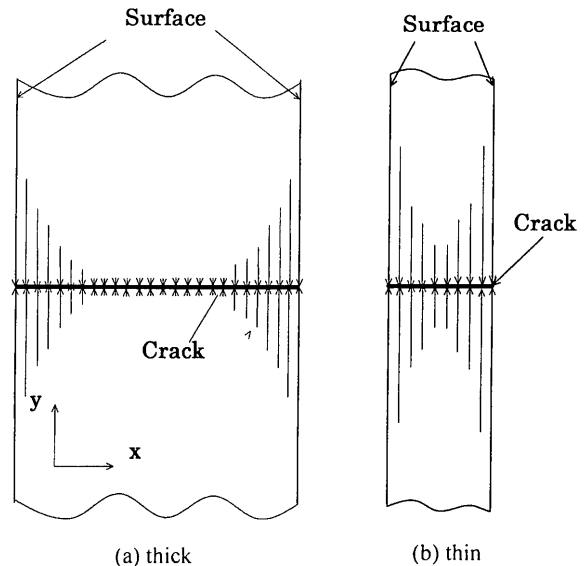


Fig.6 Figure of residual stress condition

6. 結言

- (1). 試験片厚さが薄くなるほど試験片表面の圧縮残留応力は大きくなり、 K_{op} が増加する。
- (2). 試験片厚さが薄くなるにつれて遅れ繰返し数 N_d が大きくなる。この原因は、試験片厚さが薄くなるにつれて圧縮残留応力領域が増加し、その結果き裂の開口点 K_{op} が増加し、き裂進展速度の減速が生じるためである。