ΔK_{th} 試験機の開発および迅速 ΔK_{th} 試験法の検討*近 藤 良 之^{*1}**Development of ΔK_{th} Fatigue Testing Machine and Rapid ΔK_{th} Test Method**

Yoshiyuki KONDO

Two topics relating to the ΔK_{th} test are reported. The first is a low-cost motor-driven fatigue testing machine equipped with completely automated crack measurement and K control facilities. The second is a rapid ΔK_{th} test method. In this method, a small amount of crack increment is measured by fractography on a crack surface created in a short-term program loading fatigue crack propagation test. Using either technique, a low-cost and rapid ΔK_{th} test can be achieved.

Key Words: Fatigue, Crack Propagation, Material Testing Threshold Stress Intensity Factor, Fractography

1. 結 言

材料の疲労き裂伝ば下限条件 ΔK_{th} を求める疲労き裂伝ば試験は、所定の K 値シーケンスになるように刻々と K 値制御を行う必要があり、各種の材料試験の中では難易度の高い部類に属すると言えよう。

通常この試験のためには、自動き裂長さ計測装置を組合せたコンピュータ制御の油圧サーボ疲労試験装置が使用されているが、高コストの試験装置の長時間占有の問題のほかに近年の新素材や実機切出し小形試験片の場合には、極めて微小振幅荷重の試験を長時間安定に実現することは必ずしも容易ではない。

そこで、このような ΔK_{th} 試験に関し下記の 2 点について検討した結果を報告する。

- (i) 偏芯カムを駆動源とした機械式 ΔK_{th} 試験機
- (ii) フラクトグラフィを利用した迅速 ΔK_{th} 試験法

2. 偏芯カムによる機械式 ΔK_{th} 試験機の開発

2・1 試験機の構造 小形の実体切出し材や新素材の ΔK_{th} 試験には極めて微小（例えば ± 100 N）な荷重振幅の試験が必要となり、従来の油圧サーボ試験機はこのような微小荷重には必ずしも最適ではない。そこでモータに装着した偏芯カムによって生成した強制振動変位を駆動源とし、軟らかい治具構造で試験片に伝達すれば微小荷重振幅の試験を安定に行うことができ、かつ低コストの試験機が実現できる。

試作した試験機の外観写真を図 1 に示す。構造は図 2 (a) に示す。垂直支柱を支点として回転自由にピン結合された水平姿勢のレバーの一端には、ロードセル、U リンクを介してピン結合された CT 試験片を取付ける。他端にはモータ軸に直結した偏芯カムを押し当て、モータを回転させることにより、試験片に振動荷重が負荷される。

2・2 荷重の制御 ΔK_{th} 試験を行うには試験荷重を刻々と変化させ制御する必要がある。偏芯量一定のカムを用いて荷重値を可変にするために、図 2 (b) に示す構造を採用した。荷重振幅は支点からの距離 l_1 を、また平均荷重はレバーへの押当て量すなわち l_2 を変

* 平成 2 年 11 月 16 日 日本材料学会第 20 回疲労シンポジウムにて講演、原稿受付 平成 2 年 12 月 19 日。

*¹ 正員、三菱重工業(株)高砂研究所 (〒676 高砂市荒井町新浜 2-1-1)。

えることにより実現できる。 l_1, l_2 を変えるためには図2(a)に示すニアベアリングのスライダに設けた雌ねじに嵌合する雄ねじを、コンピュータ制御のステッピングモータで回転させ直線運動させるようにした。ステッピングモータはハーモニックギヤ減速機を有するタイプで1パルス当たり0.0072度の回転角のものを使用し、極めて微量の長さ制御が可能である。

図1 ΔK_{th} 試作機の試験機外観

(a) 概略図

(b) 概念図

図2 ΔK_{th} 試作機の構造概略図

図3 偏芯カムの構造

図4 試験片

図5 荷重波形

図6 レバーの設計計算図⁽¹⁾

図 7 制御ブロック図

度は平均荷重，振幅荷重範囲ともに誤差は 10 N 以下であった，荷重繰返し周波数は 30 Hz である。

2・3 偏芯カム 偏芯カムは図 3 に示すように，モータ軸に直結した偏芯軸に針状ローラベアリングを嵌合した。ローラ数が 6 個程度の通常ローラベアリングを使用すると荷重波形に高調波成分が重畳し，荷重精度が不十分であるが，ローラ数が 15 個の針状ローラベアリングを使用すると，図 5 に荷重波形の例を示すように，ほとんどひずみがなく実用上問題のない荷重波形を得ることができた。

2・4 レバーの設計 図 2 (a) に示したレバーは変断面はりを採用することにより荷重の可変範囲を大きくした。レバーの断面形状の設計には図 6⁽¹⁾ の設計式を使用すれば良く，一定の偏芯量の偏芯カムで 10 倍程度の可変範囲を得ることは容易である。

2・5 き裂長さ計測を含む全自動制御化 本試験装置は図 7 にブロック線図を示すように，き裂長さ計測から荷重制御に至るまですべての計測・制御を 1 台のパーソナルコンピュータで実現している。

パーソナルコンピュータは 16 ビット機で，周辺機器として DIO ボード，AD コンバータボードおよびリレーボードを装備している。荷重制御は AD コンバータで読取ったロードセル信号が，所定の平均荷重と荷重振幅に対し誤差 10 N 以内になるまで DIO でステップモータに指令信号を与え荷重制御を行う。

き裂長さ計測は背面ひずみ除荷弾性コンプライアンス法⁽²⁾によっている。除荷弾性コンプライアンス法の引算量調節を自動化するために図 8 の自動調節回路を採用した。すなわち，通常は手動で調節する引算量調

図 8 引算量自動調節回路

節用ポテンショメータの代わりに，12 ビットの分解能を有する乗算形 DA コンバータを使用した。これは入力信号をディジタル指令による増幅率を乗じて出力するもので，パーソナルコンピュータは引算回路の出力を AD コンバータを介して読取り，引算後除荷弾性ヒステリシスが垂直と判定されるように DIO ボードにより増幅率を指令する。こうすれば増幅率のディジタル指令値が通常の引算量調節ポテンショメータの目盛に対応し，これよりき裂長さを知ることができる。

以上の自動化装置により，実験者は試験片を装着し， K 値シーケンスを入力し，開始指示を与えるのみで ΔK_{th} 試験が自動進行する。

2・6 試験結果の例 図 9 に本装置による試験結果の一例を示す。□印は従来の油圧サーボ試験機による 1 TCT 試験片の結果であり，●印が本装置によるデータ例である。両者はほぼ一致しており，本装置のように簡便構造低コストのものでも十分な精度で安定な試験を遂行できることを検証した。

3. 迅速 ΔK_{th} 試験法の検討

前章で開発した ΔK_{th} 試験機は低コストで大幅に省

図 9 試作 ΔK_{th} 試験機による試験結果

力化は達成でき、それなりの目的のために使用している。ところが長時間の試験期間を要するという難点は依然として解決されない。その理由として

(i) 急激な荷重減少はき裂伝ばの遅延現象を生じ、結果に悪影響を及ぼすため、ASTM 等でも極めて緩やかな荷重漸減を推奨している。

(ii) き裂長さ計測分解能は上がったとは言うものの、各荷重ステップで有効なデータ採取のためには、ある程度のき裂成長量（例えば $\Delta a = 0.2$ mm）を要し、低き裂伝ば速度域で長時間を要する。

そこで、特殊条件に限られるものの、破面にビーチマークを残し、SEM でビーチマーク間隔を読取ることにより、微小 Δa の観察を可能し、試験に要する時間を大幅に短縮する方法を検討した。

3.1 迅速 ΔK_{th} 試験結果 図 10 に示すように、高平均応力の高サイクル疲労き裂伝ば試験中に除荷すると、 $K_{max} > 30$ MPa $\sqrt{m}$ 程度の条件では、破面に図 11 に示すように延性ストライエーションの一種であるシャープなビーチマークが形成されることがわかっている。そこで図 12 のようなシーケンスで、ブロック

図 11 迅速 ΔK_{th} 試験破面の SEM 観察

図 12 迅速 ΔK_{th} 試験荷重シーケンス

ごとに異なる荷重振幅プログラム荷重波形を与えてき裂を微小量ずつ進展させ、ブロック間毎に荷重を除荷してピーチマークを形成し、進展量を識別するマーキングとして使用することとした。各ブロックにおける平均荷重は一定 ($K_{mean}=43.4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$) とし、ブロック内の繰返し数は 1×10^5 回一定とした。

試験終了後破面解放を行い、SEM 観察を行った写真を図 11 に示す。破面には各ブロックごとの伝ば領域を区分する明りょうなピーチマークが形成されていた。

条件 a~f の $\Delta K > 2.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の領域では、隣合う 2 本のピーチマークの間に、繰返し応力による組織模様を呈するき裂伝ば破面が存在し、そのピーチマーク間隔 Δa を繰返し数で除して伝ば速度 da/dN が得られる。一方、条件 g~j の $\Delta K < 2.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ の領域では繰返し応力によるき裂伝ばは認められず、ブロック間区切りに対応するストライエーションのみが観察される。

破面上で分解できる Δa は SME の観察倍率に依存するが、例えば 800 倍の観察で 0.5 mm を分解できるとすれば、 $\Delta N=10^5$ 回の場合最小伝ば速度は $6 \times 10^{-9} \text{ mm/cycle}$ となる。

図 13 に従来法の ΔK 漸減試験による ΔK - da/dN を□印で、迅速法で求めたものを●印で示す。迅速法では観察箇所にも依存するため両者には若干差があるが、ほぼ一致していると言えよう。

3・1 荷重振幅急変の影響検討 迅速法では荷重除荷とともに荷重振幅も急変させているが、この影響を調べるために図 12 のゾーン B の条件 k~n のような荷重シーケンスを与えた結果を図 13 に○印で示すが、□印とほぼ一致しており、荷重急変による影響はほとんど認められない。

従来、 ΔK 漸減き裂伝ば試験では、き裂伝ばの遅延

図 13 迅速 ΔK_{th} 試験結果と通常の ΔK 漸減試験結果の比較

を引き起こすという理由から荷重急変を避けてきたが、これは低応力比条件の場合、き裂の閉口現象を引き起こすことに起因するものと考えられる。本試験のような高平均応力条件でき裂閉口の生じない領域では、荷重除荷および荷重振幅の変更はともに顕著な影響を与えないようである。

以上の迅速法は適用範囲が高平均応力条件に限られるものの、正味実験時間を約 1/10 に大幅短縮が行えた。

4. 結 言

疲労き裂伝ば下限条件試験法に関して、低コスト

の試験装置開発および試験時間の短縮の2点について検討した。

(1) 偏芯カムによって生成した強制振動変位を駆動源とする機械式 ΔK_{th} 試験機を開発した。本装置はき裂長さ計測を含め全自動化が図られている。本試験機は ± 100 N 程度に至るまでの微小荷重試験が可能で、新素材や実機切出し材等の小形試験片にも適している。

(2) プログラム荷重波形で生成したピーチマーク間隔をフラクトグラフィにより読取る方法で微小 Δa の観察を可能とした迅速 ΔK_{th} 試験法を開発した。

文 献

- (1) 強度設計データブック編集委員会編, 強度設計データブック, (1962), 335, 裳華房.
- (2) 菊川・ほか3名, 材料, 25-276 (1976), 899.