モードII疲労試験装置の製作

高 行男・長谷川達也
大塚昭夫・小川 武史

1. はじめに

転がり軸受の寿命を決定する主な要因である転がり疲労は、転がり接触荷重を受ける部材表面層が損傷する現象である。転がり疲労の主要な損傷形態であるはくり形破損は、モードII (せん断) 形疲労き裂進展が重要な役割を果たしていると考えられている1)。したがって、その機構の解明にはモードII形疲労き裂進展則を明確にする必要がある。しかし、単純なモードII負荷を与えると、ある種のアルミニウム合金を除く鉄鋼材料など多くの構造材料ではモードII疲労き裂進展を起こさない。そのため、モードII疲労き裂進展特性に関する報告は非常に数少なく、その特性はアルミニウム合金についての大塚らによる研究2)、3) がある。他、鉄鋼材料に関してはほとんど解明されていない。また、大塚ら4)、5) は、転がり疲労によるはくり形損傷は圧縮応力重畳下におけるモードII疲労であること着目し、モードII疲労特性を検討している。

実用的観点からは、モードII疲労特性は各種材料の転がり疲労に対する強度を判定する特性値として有用である。また、一般の構造部材が圧縮とせん断負荷を同時に受ける場合にはモードII疲労による損失の可能性があるので、構造物の疲労に対する安全性確保の観点からもモードII疲労特性の解明は重要な意義があると考えられる。

本稿では、以上のような観点から、セラミックスを含む各種材料のモードII疲労き裂の進展特性を明らかにするため、圧縮応力重畳下におけるモードII疲労試験装置の製作を行ったので、その概要を述べる。

2. モードII疲労試験方法

圧縮応力重畳下におけるモードII疲労試験装置の概要を述べるにあたり、装置に関する基本事項を述べる。

2.1 き裂の変形様式

き裂の変形様式には、図1に示すような三つの基本形がある。それぞれの変形様式をモードI (開口形)，モードII (面内せん断形)，モードIII (面外せん断形) と言う。実際の機械・構造物に発生するき裂は、モードIの変形様式を受ける場合が最も多い。そのため、従来行われてきた疲労に関する膨大な研究はほとんどすべてモードI疲労に関するもので、モードIIおよびモードIII疲
労に関する研究はほとんど行われていない。これは、モードＩ疲労が重要であるという理由の他に、モードⅡおよびモードⅢ疲労に関する実験がモードＩ疲労実験と異なり、実験技術上種々の工夫と精度を要し、モードＩ疲労実験に比べ格段に困難であることも一因であると考えられる。

2.2 試験装置製作の基本的考え方

今回製作した試験装置の基本的考え方として、重要な点は次の（a）および（b）の2点に、

（a）き裂面に平行方向の圧縮応力の負荷

図2に示すように、鉄鋼材料などのき裂材に単純にモードII線返し負荷を与えると、き裂はモードIIで進展せず、き裂先端の最大引張り応力作用面に近い方向に引張り形（モードI）進展を起こす。一方、転がり疲労におけるはくり形破損（いわゆるFlaking）は、接
触応力のせん断応力成分の線返し負荷によるモードII疲労であることが以前より指摘され、ほぼ定
説となっている。ベアリングの設計もこのせん断応力が基準とされている。しかし、単純に鉄鋼材
料などにモードII線返し負荷を与えても、モードII疲労き裂進展を出現させることは出来ない。

図3 2円筒の接触により接触面からの深さz=0.5bの面（τxxが最大となる面）内に生じる応力分布

（2b=接触幅、P0=最大接触圧、xおよびzは接触面に対する接触方向および垂直方向）

転がり疲労におけるはくり形破損がモードII疲労き裂進展により起こると考えられるにも関わらず、実際にモードII疲労試験を行うとモードII疲労き裂の進展が起きないと言うことは、一見大きな矛盾である。今までその理由は明らかにされていなかったが、筆者らは、接触圧力による応力状態と単純なモードII負荷による応力状態との差によるものと考える。すなわち、接触圧力による応力状態は図3に示すように、単純なせん断応力負荷ではなく接触面に平行方向のせん
断応力 $\tau_{z}$ 他に、これと平行方向および垂直方向の圧縮応力 $\sigma_x, \sigma_z$ が、$\tau_{z}$ と重畳して作用している。疲労き裂の引張り形進展は、き裂の開閉口によって進展するので、充分な圧縮応力が負荷されていると、き裂は閉じたままなので引張り形進展は起きないと考えられる。一方、モード Ⅱ疲労き裂進展は、き裂先端のせん断変位によって起こると推察されるので、き裂の開閉口は必要とせず、圧縮応力下でも進展するものと考えられる。したがって、接触応力作用下では、圧縮応力によって引張り形疲労き裂の発生および進展が抑制され、接触面に平行方向のせん断応力（図 3 の $\tau_{z}$）によってモード Ⅱ進展が起きると考えられる。

本試験装置では上述の応力状態を再現させるため、図 4 に示すように、継返しせん断荷重に重畳して、き裂面に平行方向の圧縮力を重畳荷重させた構造となっている。接触応力の場合は、接触面に平行方向および垂直方向の圧縮応力が作用している。しかし、モード Ⅱ荷重をかけた場合、き裂がモード Ⅱき裂の延長面からそれで引張り形進展するのを防ぐのに有効な圧縮応力は、き裂面に平行方向の応力で、き裂面に垂直な圧縮応力はその目的には必要である。本試験装置においては、次項 (b) で述べるように、き裂と垂直方向には圧縮ではなく、逆に引張り応力を重畳荷重するようになっている。

(b) 静的 $K_c$ の負荷

転がり疲労におけるはくり形破壊においては、き裂面に垂直方向の圧縮応力も重要な役割を果たしていると考えられる。この圧縮応力は、き裂面間の摩擦力を大きくすることによってき裂先端に生じる $K_c$ の値を減少させるように働くと考えられるので、実際の転がり疲労強度の推定には重要である。しかし、材料特性値としてのモード Ⅱ疲労き裂進展抵抗を求めるためには、き裂面間の摩擦による影響を除く必要がある。そのため、モード Ⅱ疲労試験時には、上述のようにき裂面に平行方向の静的圧縮応力を負荷すると同時に、静的 $K_c$ を加え、き裂をわずかに開口させた状態で試験を行うようになっている。すなわち、き裂面間で摩擦が起こると、その影響の程度を推定することは極めて困難であるので、定量的に正確なデータを得るためには適当な大きさの静的 $K_c$ を負荷し、き裂面間の干渉を無視できる程度まで開口させた状態で試験を行う。本装置では、後述のように曲げモーメントにより、この静的 $K_c$ を与える構造になっている。

2.3 試験装置の構成

モード Ⅱ疲労試験に使用する試験機は、(株) 鳥津製作所社製の油圧サーボ形引張圧縮疲労試験機 (荷重容量 $9.8 \times 10^4$ N) である。この試験機に製作した治具を用いて試験片を取付け実験を行う。図 5 に試験状況の外観と各部の構成を示す。使用する試験片は、図 6 に示すような片側切欠き付平板試験片である。この切欠き部に所要のモード Ⅰの子き裂を入れた後、圧縮応力重畳下におけるモード Ⅱ疲労試験を行う。
製作した装置は、図7に模式的に示す4点せん断荷負試験法である。図中に示すように、はりに荷重P, Qを負荷すると、はりの中央部分には一様なせん断力が作用し、かつ中央断面では曲げモーメントが0になることを利用する方法である。切欠き部に発生させた予め裂は、せん断応力の作用を受け進展することとなる。

このとき荷重したモードII負荷が、き裂面間の摩擦による干渉効果を受けることなく有効にき裂先端に作用することが必要である。そのため、図8に示すように、試験片中心からℓの位置に静的引張力Psを負荷することにより試験片に曲げモーメントをかけ、これにより静的KICを負荷するようにした。

本試験法におけるモードIIの応力拡大係数KIIの値は式(1)により求められる。計算式に対応する記号を図9に示す。従来、静的KICの値(KIC)は式(2)により求めた。
図8 静的モードⅠ荷重の負荷

図9 計算式の記号

\[ K_s = F_1 r_o / \pi a \]
ここで, \( r_o = \frac{P - Q}{WB} \), \( a = \frac{a}{W} \)

\[ F_1 = -0.2915 + 6.3229a - 9.1199a^2 + 6.0570a^3 \]
ただし, \( 0.167 \leq \frac{a}{W} \leq 0.833 \)

\[ K_{Is} = \left\{ \frac{6\xi}{W^2} F_m(\xi) + \frac{1}{W} F_p(\xi) \right\} \times \frac{P_s}{L} \sqrt{\pi a} \]  
ここで, \( F_m(\xi) = \frac{2}{\pi \xi \tan \left( \frac{\pi \xi}{2} \right)} \frac{0.923 + 0.199 |1 - \sin(\frac{\pi \xi}{2})|^4}{\cos(\frac{\pi \xi}{2})} \)

\[ F_p(\xi) = \frac{2}{\pi \xi \tan \left( \frac{\pi \xi}{2} \right)} \frac{0.752 + 2.02 \xi + 0.37 |1 - \sin(\frac{\pi \xi}{2})|^3}{\cos(\frac{\pi \xi}{2})} \]
ただし, \( \xi = \frac{a}{W} \)

4点せん断荷重試験法の特徴は, 比較的純粋なモードⅠ荷重状態を実現できることの他, 試験片寸法, 形状などに制限が少なく, 試験治具の構成が単純なことにある。き裂長さの計測も容易であり, さらにK値の計算精度も高いなど, 数多くの利点を有している。しかし, 両振り試験が困難なこと, 対象となる試験材料によっては, 試験片のチャッキングに特別な配慮や治具の加工精度が高いことが必要である。

5
3. 試験装置の製作

製作した試験装置の外観を図10に、その形状を図11に示す。この装置は、図中に示す①試験片のチャックへの固定と同時に静的圧縮荷重を与える部分、②4点せん断方式のせん断荷重負荷（モードⅡ負荷）を与えるためのはりの部分、③き裂面に静的モードⅠ荷重を負荷するための構造等から成っている。試験装置の材料には主にS45Cを用いた。①の試験片のチャックへの固定と同時に静的圧縮荷重を与える方法としては、テーパ式チャックを用い、圧縮の負荷量と荷重が均一にかかることを確認するため試験片に4枚の歪ゲージを貼付した。②の4点せん断方式のせん断荷重の負荷部には鋼球を用い、荷重の負荷精度に留意した。③のき裂面に静的モードⅠ荷重を負荷するのは、き裂面間の摩擦を除去するためである。以下に、製作した装置の概要および若干の補足を述べる。
3. 1 試験片のチャッキングに静的圧縮応力の負荷

試験片に静的圧縮負荷を与えると同時にチャックの固定をする方法として、テーパ式チャックを用い、圧縮負荷が均一一にかかるようにした。図12に示すようにテーパを利用し、ねじによってテーパカラーを移動させ静的圧縮負荷が均一一にかかるように締め付ける。圧縮負荷の均一性を確認するため、試験片の片面に2枚、両面計4枚の歪ゲージを貼付した。貼付場所は、モードII疲労き裂進展経路となる部分に近い試験片の中央から左右へ5mmの両面とした。試験片とチャックとの間には試験片の上下端面に、浸炭焼入れを施したSCM415の間座を挿入した。この間座の厚さを変えることにより、試験片の寸法が若干異なる場合にも実験は可能である。長さ80mmの試験片に対し両端より39.5mmを静的圧縮負荷部とし、中央1mm間を圧縮応力重畳下におけるモードII疲労き裂進展挙動の観察部とした。

![図12 テーパ部の圧入による静的圧縮負荷部分の断面形](image)

3. 2 4点せん断方式のせん断荷重の負荷

4点せん断方式の荷重の負荷部には鋼球を用い、荷重の負荷精度に留意した。図13に示すように、支点にはf16mmの鋼球を用い、鋼球の受け側には浸炭焼入れを施したカラーポッシュを採用して治具の座りを良くし、支点となる位置の加工精度に留意した。また、左右のチャック胴が同一平面上で上下運動をするように、治具本体の側面にサイドガイドを取り付けた。試験機による荷重が試験片に対し直接かかるようにするためには治具の自重の影響を打ち消す構造にする必要がある。そのため、左右の試験片テーパ式チャック治具の下にコイルばねを利用したばね式バランス調整治具を付け、治具の自重が試験片に作用しない方法を考案した。

![図13 せん断荷重の負荷部及びばね式バランス調整治具](image)
3. 3 き裂面に静的モード I 荷重の負荷
アルミニウム製フレームとばねの利用により試験片に曲げモーメントを加え、き裂面に静的モード I 荷重を負荷してき裂面を開口させ、き裂面間の摩擦の影響を除去した。フレーム材料にはアルミニウムを用い重量軽減を計った。製作したフレーム治具は、図14に示すように、直接試験片に引張荷重を与える構造ではない。図中の圧縮ばねを圧縮して、左右の試験片チャック治具の端面に取付けたバーの端部に力(Ps)を負荷し、試験片両端に曲げモーメント(Psℓ)を作用させることにによって静的Ktを与える方式である。

図14 静的モード I 荷重負荷用フレーム治具

3. 4 補足
モード II疲労試験において、考慮した事柄を若干補足する。
モード IIのせん断形疲労き裂試験を行う前の準備として、試験片切欠き部にモード I の予き裂を導入するが、その際に用いる治具を図15に示す。ロアベースに支点となる 2 本のバーを置き、その上に試験片次いで支点となる 2 本のバー、最後にアップベースを乗せ、4 点曲げの荷重が試験片に作用するようにした。試験片に応じて繰返し荷重と繰返し数を変え、試験片切欠き部に所要のモード I の予き裂を導入する。
モード IIのせん断形疲労き裂の進展挙動を調査するためには、き裂長さの変化を測定する必要がある。き裂長さの測定には、予き裂前方に予めけがき線を 1 mm間隔で正確に入れ、き裂先端の位置をビデオカメラで観察する方法で行う。本試験装置においては、き裂進展部の観察にはビデオカメラの焦点を合わせる必要があった。そのため、き裂進展部とビデオカメラとの間に焦点距離100mmの読取顕微鏡を利用し、き裂先端の位置を観察することとした。図16にき裂長さの測定方法の外観を示す。図中のパソコンは、ビデオカメラのON-OFF制御、応力拡大係数K などの計算処理、試験装置の遠隔操作、画像処理、き裂長さの変化測定の記録などに利用する。
4. おわりに

本稿では、平成8年度科学研究費補助金（基盤研究（B））（1），転がり疲労損傷モデルとしてのセラミックス材料のモードII疲労試験法の開発）による研究の遂行にあたり，その基礎となる試験装置の製作概要を述べた．今後，本試験装置によりセラミックスを含む各種材料のモードII疲労き裂の進展特性を明らかにして行きたいと考えている。

装置の製作並びにき裂の計測手法等について，研究者，材証者である本学加藤泰世講師，井藤賀吾助教授技術試験員には，多大な御協力を頂いた．ここに記して謝意を表する。

付記；筆者の大塚昭夫は名古屋大学名誉教授，小川武史は青山学院大学理工学部機械工学科助教授である。

参考文献
1) たとえば，木村好次，関部平八郎，トライポロジー概論，養賢堂（1988）P.227。
2) A. Otsuka, K. Tohgo, T. Kiba and S. Yamada, Mode II Fatigue crack growth characteristics and mechanism in aluminum alloy 7N01-T4 weldments under mode II loading, Advances in Fracture Research, Proc. ICF6（1984）P.1671。
4) A. Otsuka and M. Aoyama, Mode II fatigue under a compressive stress field: A simplified model for rolling contact fatigue, Mixed-Mode Fatigue and Fracture, Ed by H. P. Rosmanith and K. J. Miller, European Structural Integrity Society（1993）P.49。
6) K. L. Johnson, Contact Mechanics, Cambridge University Press（1985）P.289。
8) 岡村弘三，線形破壊力学入門，佑風館（1976）