

博士論文概要

論文題目

転がり疲労はく離における双方向き裂の生成機構

Flaking failure accompanied by bi-directional cracking
in rolling contact fatigue

申請者

藤井 幸生

Yukio Fujii

2002年4月



近年、鋼の清浄度が各段に向上したのに伴い、転がり軸受を通常の条件で使用する上においては、材料本来の転がり疲労強度で決まる、いわゆる内部起点型のはく離はほとんど生じなくなっている。それに対し、むしろ、希薄潤滑下や異物混入下など良好な潤滑条件が保たれないときに、予測寿命に対して早期に生じる表面を起点としたはく離が問題になっている。

一般に、転走表面から内部に向かってき裂が存在する場合、それが荷重移動方向に対して順向きであれば伸びやすく、逆向きであれば伸びにくい。このことは古くにき裂内への潤滑油の進入・閉込という機構で定性的に説明され、以後の研究によって支持されている。通常、表面起点型のはく離は、き裂が荷重移動方向に伸びて起こる。このような場合、起点となった箇所にしばしば異物などによってできた圧痕が観察される。圧痕が起点となる場合には、必ず圧痕の後縁から荷重移動方向に伸びるき裂を伴ったはく離が形成される。このメカニズムは、例えば潤滑油膜のスクイーズ効果を考慮した過渡解析によって説明されている。

ところが、実際には、荷重移動方向に対して順向きだけでなく逆向きにも伸びるき裂を伴うはく離が発生することがある。これも表面起点型のはく離の一種であると考えられるが、表面に圧痕などの起点らしきものが見当たらないことが特徴の一つである。このような特異な形態のはく離が問題視され始めたのは比較的最近のことである。その一因として、近年、機械の静肅性が向上したのに伴い、はく離が大きく成長する前に検出されるようになったことが挙げられる。現在までき裂が逆向きに伸びるメカニズムは明らかにされておらず、その防止策を講じることができなかつたため、原因の究明が強く望まれてきた。

荷重移動方向に対して逆向きに伸びるき裂を生じさせようとする従来の研究の多くは、転走面に人工欠陥を導入し、その周りに生じる損傷に着目したものである。これらの場合、転がり軸受では考えられないような大きな欠陥を導入したり、大きな相対すべりを与えていた。一方、欠陥がない滑らかな表面に発生する逆向きに伸びるき裂を伴うはく離は、鉄道レールに生じるダークスポットと呼ばれる損傷で、水潤滑と乾燥状態を繰返すことで再現できると報告されている。しかしながら、鉄道レールに対し転がり軸受では、その使用条件を考えると、水潤滑や乾燥状態は考えにくい。なお、逆向きに伸びるき裂が形成されるメカニズムは明解に述べられていない。

本研究では、今まで明らかでなかつた荷重移動方向に対して逆向きに伸びるき裂の出現に着目し、その再現及びメカニズムの解明を課題に取り上げた。以下に得られた結果を要約する。

前述のように、実際の転がり軸受に生じる荷重移動方向に対して両側に伸びるき裂を伴うはく離は、表面に圧痕などの起点らしきものが見当たらないことが特徴である。そこで、相手面の欠陥によって滑らかな表面に発生するはく離に着目した。大小2つの円筒が接触する2円筒試験において、大円筒の表面に人工的に

圧痕を複数個付けたところ、相手側の圧痕がない小円筒の表面に荷重移動方向に対して両側に伸びるき裂を伴うはく離が必ず生じることを見出した。その特異なはく離の形態は、荷重の大小、従動側か駆動側か、強制的な接線力の有無、回転速度の大小、圧痕の大小などの条件によらず現われたことから、相手表面の圧痕が滑らかな表面に与える影響が原因であることがわかった。また、はく離寿命に及ぼす試験条件の影響について示した。なお、以下では、荷重移動方向に対して順向きに伸びるき裂を「順き裂」、逆向きに伸びるき裂を「逆き裂」と呼ぶ。

順き裂と逆き裂を伴うはく離が形成されるプロセスを明らかにするため、相手面の圧痕が接触域を通過するときの力学的状態の変化を境界要素法によって解析するとともに、実際のはく離の詳細な観察を行った。解析の結果、相手面の圧痕が接触域を通過するとき、接触圧力は圧痕縁周辺で鋭く立ち上がり、圧痕がないときの約3倍になった。この影響により、滑らかな表面内部の相当応力は圧痕縁直下で大きくなり、その値は圧痕がないときの約2倍になった。相当応力の他表面に平行なせん断応力も圧痕縁直下で最大になり、その値は圧痕がないときの約2倍になった。一方、断面観察の結果、表面にはく離がない箇所には、相当応力や表面に平行なせん断応力が最大になる深さ辺りに、表面にほぼ平行に存在する微小き裂が見られた。また、小さめのはく離の断面を見ると、一見逆き裂のみを伴うものや、逆き裂に加え短い順き裂を伴うものが見られ、順き裂と逆き裂を伴うはく離に成長する途中の様子が伺えた。これらのことから、順き裂と逆き裂を伴うはく離の形成プロセスは以下の(1)～(4)の順であることがわかった。(1)相手表面の圧痕の影響により最も疲労が蓄積され易くなる表層近傍にき裂が発生し、(2)それが表面に平行なせん断応力の寄与により表面にほぼ平行に成長し、(3)やがてき裂直上の表面の一部が剥がれ、少なくとも逆き裂を伴う小さなはく離が形成され、(4)それがさらに転動を受けて徐々に荷重移動方向に広がり、最終的に順き裂をも伴つたはく離が形成される。

転がり疲労下の疲労き裂の進展様式はモードⅡ型(せん断型)が支配的と考えられる。したがって、転がり疲労を受ける材料のモードⅡ疲労き裂進展特性は、転がり疲労寿命を支配する重要な材料特性の一つと考えられ、それを正確に求めることは、疲労機構の解明に有効と考えられる。従来、アルミ合金や軟鋼のモードⅡ疲労き裂進展特性はよく調べられているが、軸受鋼のような高硬度材料のモードⅡ疲労き裂進展特性を求めるることは困難とされ、研究例が少なかった。そこで、新たなモードⅡ疲労き裂進展試験法を考案し、実際に軸受鋼SUJ2のような高硬度材料についてもき裂進展速度 da/dN と応力拡大係数範囲 ΔK_{II} の関係を求めることができた。新たな試験法は、き裂に平行な方向に静的な圧縮応力を負荷することで引張型進展を阻止するとともに、き裂にモードⅠ型の静的開口を与えてき裂面間の干渉を防ぐという考えに基づく。これらの2つの静的負荷を試験片に重畠した状態で、直接せん断方式により繰返しモードⅡ負荷を与えるもので、

比較的コンパクトで扱い易く、両振り、片振りを含む任意の応力比での試験が可能である。具体的に得られたモードII疲労き裂進展特性は、き裂に平行な方向に与えた圧縮応力の大小によらず、モードII進展し始める $\Delta K_{II\text{-threshold}}$ は約3 MPa \sqrt{m} であった。 ΔK_{II} の値が $\Delta K_{II\text{-threshold}}$ 以上、上限値 $\Delta K_{II\text{T}}$ 以下の範囲ではモードII進展を示し、 $\Delta K_{II\text{T}}$ を超えると引張型に遷移して斜めに進展した。上限値 $\Delta K_{II\text{T}}$ の値は、き裂に平行な方向に与えた圧縮応力の大きさに依存し、圧縮応力が大きいほど $\Delta K_{II\text{T}}$ は大きくなつた。

先に明らかにした順き裂と逆き裂を伴うはく離の形成プロセスのうち、上記の(2)から(3)へ至る段階、つまり、今まで不明とされてきた逆き裂を伴うはく離が形成される現象に着目した。そのメカニズムの解明するため、有限要素法により表面に平行な微小き裂の上を相手面の圧痕が通過する場合をシミュレートし、先に実験で得られたモードII疲労き裂進展特性に基づき、微小き裂の進展挙動の解析を行つた。その結果、圧痕の影響により、微小き裂先端の応力拡大係数範囲の最大値 $\Delta K_{II\text{max}}$ は $\Delta K_{II\text{-threshold}} \approx 3 \text{ MPa}\sqrt{m}$ よりも大きくなることから、微小き裂は表面に平行にモードII進展し得ることがわかつた。微小き裂がさらにモードII進展し続けると、き裂長さに比例して $\Delta K_{II\text{max}}$ は大きくなり、やがてき裂先端に作用する引張応力の寄与がせん断応力に打ち勝つて引張型で斜めに進展し始める。引張型に遷移する際のき裂の進展方向は、引張応力の寄与を打ち消すように作用する表面に平行な圧縮応力の大きさによって決まる。接触面下に作用する表面に平行な圧縮応力は表面で最大になり、内部に向かうにつれて減少する。したがつて、微小き裂が引張型進展に遷移した後、その両端は表面に平行な圧縮応力が小さい内部に向かうことがわかつた。それとともに起点付近の表層浅い部分の剛性が弱くなつて剥がれ、ついには少なくとも逆き裂を伴うはく離が形成されることがわかつた。

以上の研究成果をもとに、人工欠陥を導入した転動体を組み込んだ転がり軸受の運転試験を行つた結果、軌道輪に順き裂と逆き裂を伴うはく離が再現できた。これにより、今まで不明とされてきた逆き裂を伴うはく離の発生原因とメカニズムの究明ができ、その発生に対する対策を講じることができた。