

転がり軸受のはく離強度に及ぼす微小欠陥の影響に関する研究

橋本, 翔

<https://doi.org/10.15017/1866296>

出版情報 : 九州大学, 2017, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 橋 本 翔

論 文 名 : 転がり軸受のはく離強度に及ぼす微小欠陥の影響に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

機械要素の一つである転がり軸受に見られる転がり疲労はく離損傷は、構成部品である転動体と軌道輪が Hertz 接触することによって生じるせん断応力が材料内部に繰返し作用することによって引き起こされる。その主な起点は材料中に不可避に存在する非金属介在物であり、これが応力集中源となって疲労き裂が発生する。このことから、古くから、材料の清浄度の向上は転がり軸受を長寿命化するための最重要課題と位置付けられてきた。一方、近年は、コスト低減の観点から、全ての転がり軸受に高純度鋼を適用するのではなく、要求される品質・信頼性に応じて材料を使い分け、コストと信頼性のバランスを取ることも重要となりつつある。

転がり軸受の強度設計において、材料の清浄度に応じて変化するはく離強度の推定は極めて重要である。従来、はく離寿命の推定式は確率・統計的な観点から構築されてきたが、より高精度な寿命の推定を可能にするためには、疲労き裂問題としての評価が不可欠となる。過去の研究により、内部起点はく離は、介在物を起点として発生したき裂がせん断型で進展して起こることが明らかになっている。しかし、現時点では、はく離強度やはく離寿命を疲労き裂問題として定量化できるまでには至っておらず、破壊現象と破壊力学に立脚したより合理的な評価手法の確立が求められている。

本研究では、転がり軸受のはく離強度を破壊力学の観点から定量的に説明することを目的とした。はじめに、微小ドリル穴を付与した転がり軸受の疲労寿命試験と、応力拡大係数の FEM 解析から、これまでに平板状試験片についてのみ有効性が確認されている破壊力学的評価手法が、実際の転がり軸受に対しても適用可能であることを示す。さらに、人工欠陥を付与しない平滑な転がり軸受を用いて、非金属介在物が起点となる場合はく離強度の評価を行う。そして、介在物寸法と公称せん断応力から計算されるモード II 応力拡大係数を用いることによって、介在物が起点となる場合はく離強度を定量的に評価できる可能性を示す。本研究によって、転がり軸受のはく離強度・寿命を従来の方法に比べて合理的にかつ高精度に予測することが可能となる。さらに研究を発展させれば、軸受の疲労強度設計や材料選定の新基準の構築に繋がると期待される。

第 1 章では、転がり軸受の内部起点はく離の寿命に関する従来の評価手法とともに、はく離現象についての過去の研究をまとめた。さらに、せん断型の疲労き裂問題としてはく離寿命を評価することの必要性を述べた。加えて、今後の課題を整理し、本研究の目的と概要を述べた。

第 2 章では、第 3 章で述べる微小ドリル穴付き転がり軸受の試験結果を定量化するために、3 次元 FEM 解析を行い、微小ドリル穴のエッジ部から発生したき裂の応力拡大係数を求めた。微小ドリル穴の上を転動体が通過するモデルの解析に先立ち、本研究で採用する応力拡大係数の FEM 解析手法の妥当性を確認するために、厳密解との比較が可能な単純なモデルの解析を行った。その後、転動体通過時の、ドリル穴エッジ部から発生した環状き裂のモード II 応力拡大係数範囲 ΔK_{II} を解析

した。その結果、環状き裂の ΔK_{II} は、せん断を受ける無限体の内部に存在する円盤状き裂の ΔK_{II} と、ある補正係数を介して精度よく関連付けられることが明らかとなった。すなわち、ドリル穴縁の環状き裂の ΔK_{II} は、無限体中の円盤状き裂の ΔK_{II} を単一の係数で補正することによって、ドリル穴直径 0.05 ~ 0.2 mm, ドリル穴エッジ部深さ 0.05 ~ 0.345 mm, 最大接触面圧 2.0 ~ 3.0 GPa の範囲で一律に評価が可能であった。この結果は、第 3 章で示す転がり疲労試験結果の定量化に適用された。

第 3 章では、軌道面に微小ドリル穴を付与した転がり軸受を用いて、転がり疲労試験を実施した。全ての試験において、疲労き裂はドリル穴底付近のエッジ部から発生し、せん断モードで進展した。疲労寿命データは、 ΔK_{II} を用いて整理することによって、ドリル穴の直径や深さによらず狭いバンドの中に収まった。加えて、モード I 疲労き裂について広く知られている下限界応力拡大係数範囲のき裂寸法依存性と類似の依存性が、転がり接触下で進展・停留するせん断型疲労き裂においても存在することが確認された。転がり疲労試験によって得られた下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{IIth} は、他の研究者によって静的圧縮応力下のねじり疲労試験で取得された値とよく一致した。 ΔK_{IIth} のき裂寸法依存性を考慮した修正 $S-N$ 線図により、応力拡大係数に基づく疲労寿命推定法の有用性が示された。

第 4 章では、非金属介在物を起点とした転がり軸受のはく離強度を応力拡大係数によって評価することを試みた。実験には、事前の超音波探傷において軌道面直下に介在物と推定される内部欠陥が検出された軸受を供した。はく離が生じた軸受について、SEM 観察によって酸化物系介在物が起点位置にあることを確認した。介在物から発生したき裂の ΔK_{II} を、介在物を模擬した FEM モデルを用いて解析した。その結果、介在物から発生したき裂についても、 ΔK_{II} をパラメータとすることにより、転がり疲労強度を一律に評価できることを示した。また、FEM 解析で得られた ΔK_{II} の推定式を用いることにより、き裂発生起点となる介在物の種類や寸法によらず、転がり軸受の内部起点はく離強度を一律に評価できる可能性を示した。

第 5 章では、上記の結果を総括した。