

転がり軸受の疲労割れ発生限界に関する研究

渡貫, 大輔

<https://hdl.handle.net/2324/4475131>

出版情報 : Kyushu University, 2020, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名 : 渡 貫 大 輔

論 文 名 : 転がり軸受の疲労割れ発生限界に関する研究

区 分 : 甲

論 文 内 容 の 要 旨

転がり軸受において割れが発生する確率はそれほど高くないものの、発生した場合には破断した部材の噛みこみによって回転がロックするだけではなく、破片の飛散が周辺機械の損傷を引き起こす可能性がある。そこで、機械の重大事故を防ぐためには、転がり軸受の割れを防止する必要がある。転がり軸受の軌道面には、転がり疲れによって不可避的にはく離損傷が発生する。そのため割れの中でも、はく離を起点として割れる現象は、転がり軸受の最終的な強度として本質的に重要な問題である。従来、転がり軸受の割れは、破壊靱性やシャルピー衝撃エネルギー、あるいは疲労限度設計によって評価されてきた。しかしながら、軌道面から疲労で割れる限界は未解明である。転がり軸受の疲労割れを定量的に予測するためには、破壊力学の見地から転がり軸受の割れ現象をモデル化して実験で検証すること、はく離した転がり軸受が繰り返し応力を受ける場合の応力拡大係数を明らかにすること、および軸受鋼の疲労き裂進展抵抗を精確に評価することが必要である。

本論文では、円筒コロ軸受を用いたシンプルな割れの再現試験方法を提案する。次に、割れが発生する場合の応力拡大係数を有限要素法 (FEM) で計算し、転がり接触における割れの応力状態を明らかにする。さらに、軸受鋼 (JIS-SUJ2) のき裂進展抵抗を異なる応力比において測定し、同時にき裂の開閉挙動を評価する。最後に、これらを総合して破壊力学的モデルを構築し、転がり軸受の割れ限界の新しい基準を示す破損マップを提案する。

第 1 章では、転がり軸受を取り巻く環境と、転がり軸受の疲労破壊に関する近年の研究例をまとめた。疲労で割れる限界を定量的に解明するための課題を指摘し、本研究の目的と概要を述べた。

第 2 章では、転がり軸受のはく離を起点とした割れを再現する試験方法を提案した。円筒コロ軸受の外輪軌道面に、はく離を模擬した人工欠陥を設けた。さらに軸受とハウジングのはめ合い (Fitting-gap) を変えて転動疲労試験を行うことで、外輪が人工欠陥を起点として疲労で割れる結果を得た。き裂進展方向を考察するため、外輪とハウジングおよび転動体の FEM モデルを作成し、人工欠陥の底部に発生する応力を計算した。その結果、人工欠陥の形状の影響を受けて斜めにき裂進展することはあるものの、本質的にはモード I き裂進展が支配的であることが示唆された。

第 3 章では、人工欠陥を有する軸受の応力拡大係数を FEM によって計算することで、転がり軸受のはく離を起点として割れる現象を定量的に理解することを目指した。まず第 2 章の再現試験と同じ円筒コロ軸受について、欠陥深さを変化させた解析を行った。その結果、転がり軸受の割れにおいては、応力拡大係数範囲と応力比が、Fitting-gap とき裂長さに依存して複雑に変化することが明らかとなった。次に第 5 章で破損限界を検証するための準備として、割れ再現試験の全 10 条件の初期の応力拡大係数範囲 $\Delta K_{\text{initial}}$ と、初期の応力比 R_{initial} を計算した。最後にコロの位置を細かく変えることで、1 サイクル分のモード I とモード II の応力拡大係数範囲 ΔK_{I} と ΔK_{II} の変化を計算した。 ΔK_{II} の計算値はき裂進展限界の文献値よりも小さかったのに対し、 ΔK_{I} の計算値はき裂進展限

界の文献値よりも同じか大きかった。このことから、転がり軸受の割れ現象においては、モード I き裂進展が支配的であることが明らかとなった。

第 4 章では、軸受鋼の正負の応力比におけるき裂進展抵抗測定と、き裂開閉口測定を行った。応力比 $R = 0.1, 0.3, 0.5$ の条件で矩形試験片の 4 点曲げ試験を行い、下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} が $3 \sim 3.5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ という値を得た。破面観察からは、停留点付近でき裂閉口が起こっていたことが示唆された。 $R = -1, -3$ の条件で丸棒状試験片の一方向引張圧縮試験を行い、き裂進展限界と、停留き裂のき裂開閉口挙動を評価した。下限界有効応力拡大係数範囲 $\Delta K_{eff th}$ は $R = -1$ のときに $2.8 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $R = -3$ のときに $2.7 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であり、き裂閉口応力拡大係数 K_{cl} は $R = -1$ のときに $1.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$, $R = -3$ のときに $1.1 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ であった。過去の研究で $R = -5, -10$ で測定された値と一緒に傾向を確認したところ、応力比が低くなるにしたがって、き裂閉口点が圧縮応力側に移動することが明らかとなった。

第 5 章では、第 2 章から第 4 章で得られた知見を利用して、転がり軸受が割れる現象を破壊力学的モデルにより統合し、検証した。第 4 章の材料強度試験結果の平均から、 $\Delta K_{eff th} = 2.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ という値を得た。また最小二乗法によって、 $K_{cl} = -0.17(1 - R) + 2.0 \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$ という近似式を得た。これらの結果と $\Delta K_{eff th}$ の定義式から、軸受鋼がモード I き裂進展で破損する限界を、下限界最大応力拡大係数 $K_{max th} = -0.17(1 - R) + 4.6$, (ただし下限界最小応力拡大係数 $K_{min th} \leq K_{cl}$ の場合), $K_{max th} = 2.6/(1 - R)$, (ただし $K_{min th} > K_{cl}$ の場合) という式で表した。これらの破損限界を第 2 章の軸受割れ再現試験結果とマップ上で比較したところ良い一致を示した。以上より、今後転がり軸受の疲労による割れを防止するための考え方と基準を確立することができた。最後に本研究の破損基準を浸炭軸受に適用するための問題点を検討し、浸炭鋼の疲労き裂進展抵抗に及ぼす合金成分と熱処理の影響を評価する必要があることを示した。

第 6 章では上記の結果を総括した。