

高周波超音波探傷による転動疲労き裂進展の評価(第3報)

Evaluation of Rolling Contact Fatigue Crack Propagation by Using High Frequency Ultrasonic Testing
(Part III)

NTN株式会社 (正)*岡田 尚弘, (正) 藤田 工

富山大学 (非) 溝部 浩志郎, (正) 木田 勝之

Takahiro Okada*, Takumi Fujita*

Koshiro Mizobe**, Katsuyuki Kida**

*NTN Corporation, **University of Toyama

1. はじめに

転がり軸受の内部起点型剥離は, 材料に含まれる非金属介在物等の内部欠陥から発生したき裂に, 表面に平行なせん断応力が繰り返し負荷されることで発生すると考えられている. したがって, 転がり軸受の内部起点型剥離の発生リスクは, 転がり接触面下のき裂形状, き裂周辺の応力分布, 材料のモードII (せん断型) き裂進展特性に基づいて検討する必要がある. 著者らは, 軌道面にドリル穴を加工したスラスト玉軸受 (51106) の転動試験を行い, ドリル穴から発生したき裂の転動疲労による進展を, 高周波の超音波探傷(以下, UT)で定量的に評価できることを報告した^{1, 2)}. この評価法で得られる転動面下のき裂進展挙動と整合するように, 転動面下のき裂先端の応力拡大係数の計算方法と軸受材料のモードII (せん断型) き裂進展特性について議論を深めれば, 転がり軸受の内部起点型剥離の発生リスクは従来よりも合理的に検討できるようになる.

本報では, 転動面下のき裂進展挙動と整合するように, 応力拡大係数計算で用いるき裂面間の摩擦係数 (以下, μ および μ') を推定することで, 転がり軸受の使用中の接触面圧 (以下, 接触面圧) と転動疲労き裂進展が起こらないき裂の限界寸法 (以下, 許容き裂寸法) との関係性を求めた.

2. μ の推定方法と許容き裂寸法の計算

μ は次の①~⑦の手順で推定した. ①ドリル穴加工した 51106 に転動疲労を与えドリル穴底から初期き裂を発生させる, ②UT によりき裂の超音波画像(以下, UT 画像)を取得する, ③UT 後の試験片に①と異なる荷重条件で転動疲労を与える(以下, き裂進展試験), ④き裂進展試験後の UT 画像からき裂進展有無を確認する, ⑤断面調査によりき裂の深さを測定する, ⑥ドリル穴から発生したき裂の大きさと深さを反映した FEM モデルを作成する, ⑦過去に報告された軸受鋼の ΔK_{IIth} の文献値と④のき裂進展有無の結果が整合する ΔK_{II} が得られるように FEM 解析により μ を推定する.

Table 1 に初期き裂発生時とき裂進展試験時の転動条件を示す. 試験片のスラスト玉軸受軌道輪には, 前報^{1, 2)}と同様, 軌道溝底に $\phi 0.1$, 深さ 0.1 のドリル穴を加工した. Table 2 にき裂進展試験前後に行う UT 条件を示す. き裂進展試験における ΔK_{II} は, UT 画像から計測したき裂の周方向の長さ, 断面観察により測定したき裂の深さを反映した FEM モデルを用いて計算した. Figure 1 に FEM モデルの例を示す. FEM モデルでは, き裂の進展方向は軌道面と平行とし, ドリル穴深さを初期き裂先端深さと同一とした. なお, μ はき裂面の凹凸, き裂面間へ侵入した潤滑油の状況, き裂面間に作用する荷重によって変化する可能性があるが, 本解析ではそれらの影響は考慮していない. 本モデルを使用し, 転動体がドリル穴上を通過するときの Fig.1(b)A・B 点における ΔK_{II} を求めた. μ の推定で用いる ΔK_{IIth} には, 寸法依存性の指摘³⁾があるが, 本報では藤井らにより報告された軸受鋼の $\Delta K_{IIth}=3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ ⁴⁾を用いた. 接触面圧と許容き裂寸法の関係性は, 推定した μ と $\Delta K_{IIth}=3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ から FEM 解析で求めた.

Table 1 Condition of rolling contact fatigue testing

	Crack initiation	Crack propagation
Bearing type	51106	
Ball size × number	1/4 inch × 3	
Load	4.9 kN	2.2 kN
Maximum contact pressure	3.7 GPa	2.8 GPa
Semi-major axis of contact area	1.07 mm	0.82 mm
Semi-minor axis of contact area	0.20 mm	0.15 mm
Lubrication	Turbine Oil VG56 (Oil bath)	
Rotational speed	2500 min ⁻¹	
Number of cycles	5 × 10 ⁵ cycles	2.5 × 10 ⁶ cycles

Table 2 Condition of ultrasonic testing

Frequency	200 MHz
Probe diameter	2 mm
Focal distance	2.9 mm
Beam diameter	11 μm
Scanning pitch	1 μm

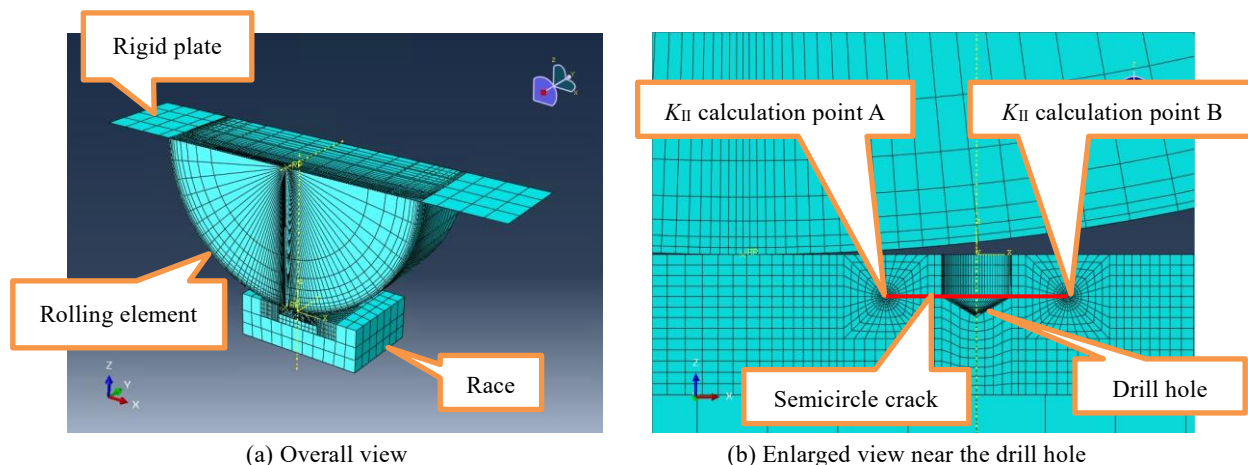


Fig.1 FEM model

3. 結果と考察

Figure 2 にき裂進展試験前後の UT 画像から測定したき裂長さを示す。図中には、前報¹⁾で確認した UT 画像による測定誤差をエラーバーで示した。Hole No.1 の試験後き裂長さは、測定誤差を考慮しても、試験前と比較して有意に長くなっており、き裂進展試験によりき裂が進展していたと判断できる。一方、Hole No.2 のき裂は、き裂進展試験により約 20 μm き裂が進展しているが、これは試験前のき裂長さ測定誤差範囲内であり、有意にき裂が進展しているとは言えない。よって、Hole No.2 のき裂は停留していると考えた。Hole No.1 において $\Delta K_{II} > \Delta K_{IIth}$ となり、き裂停留した Hole No.2 において $\Delta K_{II} < \Delta K_{IIth}$ となる μ を推定値 μ' とした。Figure 3 に μ' から計算した接触面圧と許容き裂寸法を、応力拡大係数ハンドブックの計算式⁵⁾から求めた許容き裂寸法との比で表した結果を示す。き裂進展試験の結果と整合するように推定した μ' は、応力拡大係数ハンドブックで仮定されている μ よりも大きく、許容き裂寸法は応力拡大係数ハンドブックの計算結果と比べて接触面圧全域で大きくなった。

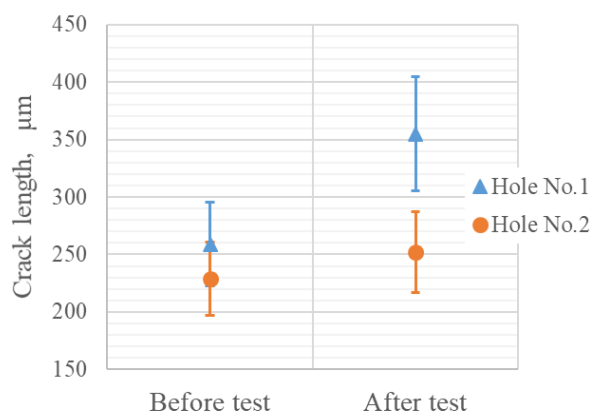


Fig.2 Crack propagation test results obtained by UT

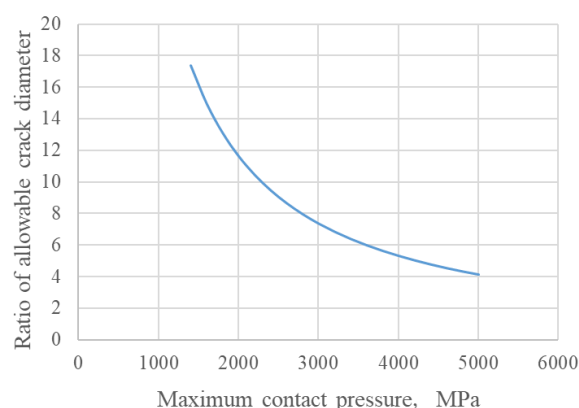


Fig.3 Relationship between maximum contact pressure and ratio of allowable crack diameters calculated by FEM. The ratio is calculated as “FEM calculation assuming μ' ” / “stress intensity factors handbook calculation”.

4. まとめ

本報では、軸受鋼の転動面下のき裂進展挙動の結果に整合する μ' を推定することで、実験事実と整合するに接触面圧と許容き裂寸法の関係を求めた。推定した μ' から求めた許容き裂寸法は、応力拡大係数ハンドブックで計算した許容き裂寸法と比較して、接触面圧全域で大きくなった。

文献

- 岡田尚弘, 藤田工, 溝部浩志郎, 木田勝之, 高周波超音波探傷による転動疲労き裂進展の評価, トライボロジー会議2021 春 東京 予稿集, (2021), 109-110.
- 岡田尚弘, 藤田工, 溝部浩志郎, 木田勝之, 高周波超音波探傷による転動疲労き裂進展の評価(第2報), トライボロジー会議2021 秋 松江 予稿集, (2021), 117-118.
- 橋本翔, 小俣弘樹, 松永久生, 転がり軸受の剥離強度に及ぼす微小欠陥寸法の影響(第2報: 応力拡大係数に基づくドリル穴を有する転がり軸受の剥離強度の評価), 日本機械学会論文集, Vol.83, No.852, (2017).
- 藤井幸生, 前田喜久男, 大塚昭夫, 高硬度材料のモードII疲労き裂進展特性を求めるための新試験法, 材料, Vol.50, No.10, (2001), 1108-1113.
- Y. Murakami, STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK, Vol.2, 日本材料学会 破壊力学部門委員会, (1987), 1155-1162.