

エレベータ用巻上機の軸受損傷診断の研究

Research on bearing fault diagnosis for the elevator traction machines

三菱電機ビルソリューションズ（株）（正）*木村 康樹 （非）新倉 脩平

Yasuki Kimura*, Shuhei Niikura*

*Mitsubishi Electric Building Solutions Corporation

1. はじめに

エレベータはビル内の上下移動のインフラとして重要な機器であり、これまでに様々な性能向上¹⁾が図られてきた。また、定期的に保守・点検を行うことで高い信頼性と安全性を確保してきた。エレベータを構成する代表機器である巻上機の外観を Fig.1 に示す。ロープがかかった綱車をモータ側とブレーキ側に配置した2つの軸受で支持する構造となっている。軸受の故障は運行停止につながるため、軽微な損傷段階で交換することで停止期間を短縮することが求められている。従来から、軸受の故障は振動や音に着目して各種の診断手法が開発²⁾³⁾されてきたが、軽微な段階での損傷診断については、特定軸受の継続監視による例が多く、運転条件が異なるような複数の軸受を網羅的に診断する報告例は少ない。本研究では、市場で稼働している複数台の巻上機と試験装置での振動を測定することにより、統計的な診断基準を検討した結果について述べる。

2. 市場軸受の振動分析

2.1 測定方法

巻上機の軸受振動は、Fig.1 に示すようにモータ側とブレーキ側の2つの軸受台にそれぞれ加速度計を取り付けて、巻上機を運転して測定した。測定したデータの一定速度区間を抽出して、Fig.2 に示すようにエンベロープ処理による周波数解析を行い、診断指標として、内外輪やころの傷成分を表すピーク値と、摩耗・潤滑不良に起因する全体振動を表すオーバーオールを算出した。さらに、市場で稼働中の巻上機は運転速度やラジアル荷重などの仕様の違いがあるため、以下のような補正を行った。まず、Fig.3 に示す試験装置を用いて軸受が損傷するまで試験を行い、損傷した状態で速度と荷重を変えて振動測定し、それぞれの補正係数を算出した。各巻上機の測定結果に上記の補正を行って同一運転条件になるようにした。

2.2 測定結果と課題

Fig.4 に、測定時の総回転数を横軸にとり、縦軸にピーク値、オーバーオールをとったものを Fig.4(a), (b)にそれぞれ示す。正常なものを○、損傷有と判断されるものを△として示した。縦軸は 2.1 項の補正を行ったため、無次元化している。

また、市場の巻上機の多くは正常であり、損傷有のものが少ないため、データ分布が偏っている。偏りの影響を減らすために、Fig.3 の試験装置を用いて、複数個の試験軸受について耐久試験を実施して、振動データを測定し、正常を●、損傷有を▲として示した。損傷有無の判断方法は、振動や騒音が大きなものは軸受を取り外して確認し、その他は取り外さずに、振動測定結果と音やグリース分析結果から判断した。

Fig.4 より、総回転数とピーク値、オーバーオールとの間に強い相関は見られないことから、回転数のような寿命因子の影響は少なく、個々のばらつきの方が大きい結果となった。また、測定結果については下記3つのパターンが見られた。

- A) ピーク値、オーバーオールともに大きい
- B) ピーク値は大きいがオーバーオールは小さい
- C) ピーク値は小さいがオーバーオールは大きい

ここで対象とした巻上機に用いられる自動調心ころ軸受は、“外輪傷成分と同じ周波数のころ落ち振動”が発生するため、ほとんどの軸受で小さなピークが測定された。小さなピークはころ落ち振動によるものか、軽微な外輪傷かを見分けることは困難であった。さらに巻上機では、ロープが綱車に接触する際に微振動が発生することがあり、その影響が外乱として加わるが、オーバーオールでは軸受による振動と外乱振動とを分離することができない。

以上のことから、巻上機の軸受の損傷診断においては、ピーク値やオーバーオールだけで軽微な損傷を判断するこ

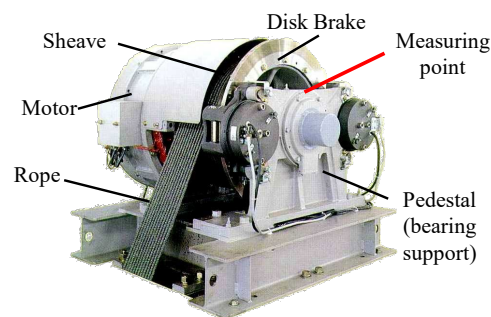


Fig. 1 Overview of the traction machine

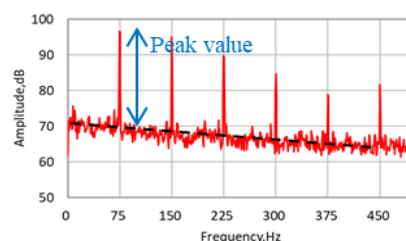


Fig. 2 Frequency analysis

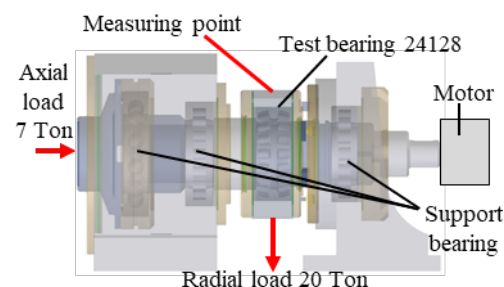


Fig. 3 Schematic of the test machine

とが難しいことがわかった。

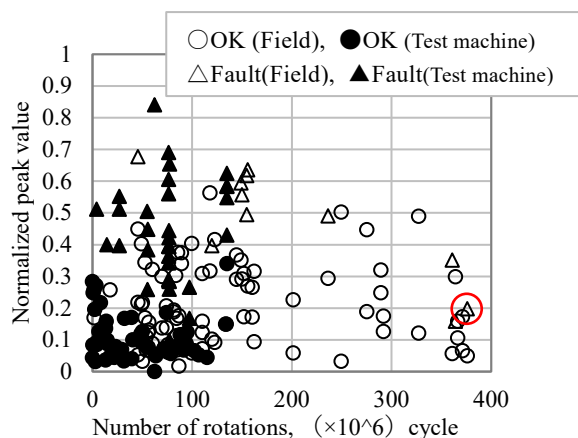


Fig. 4(a) Peak measurement result

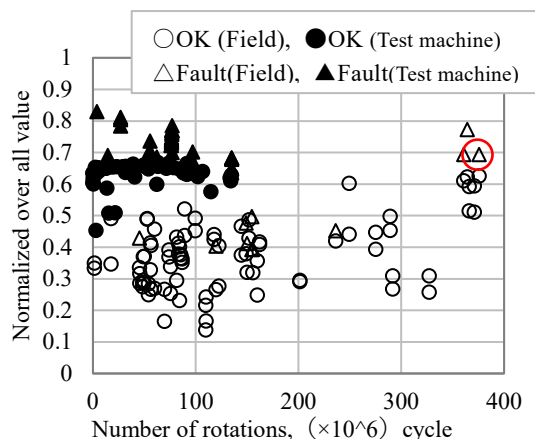


Fig.4(b) O.A. measurement result

3. ロジスティック回帰分析による診断

上記の課題を解決するために、正常と損傷有の2つに分類する方法として、(1)式のロジスティック回帰分析を用いることにした。

$$Y = \frac{1}{1 + \exp \{-(a_0 + a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_n x_n)\}} \quad (1)$$

目的変数 Y は 0～1 の間の値をとり、確率的な診断結果となることから、Y が小さな場合は軽微な損傷と見なせる。モデルを作るために、各巻上機の診断結果を正常の場合を 0、損傷有の場合を 1 として Y の学習値とする。説明変数 $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ には、各巻上機で測定したオーバーオール、ピーク値、総回転数を用いて(1)式に代入し、最尤法で係数 $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$ を計算してモデルを作成した。いくつかの変数を選択してモデルの性能を比較した結果を Table1 に示す。

Table 1. Logistic regression analysis result

Model	Explanatory variable				Accuracy	AIC	ROC-AUC
	x1	x2	x3	x4			
1	O.A.	Peak			0.9527	45.011	0.984
2	O.A.	Peak	Number of rotations		0.9527	46.212	0.984
3	O.A.	Peak	O.A. x Peak		0.9704	43.943	0.986
4	O.A.	Peak	O.A. x Peak	Number of rotations	0.9704	44.965	0.986

モデルの性能比較として、混同行列の正答率(Accuracy)が高いこと、赤池情報量基準(AIC)が小さいこと、ROC 曲線の面積(AUC)が 1 に近いことを考慮すると、モデル 3 が最も良い結果となった。モデル 3 の説明変数 x_3 はオーバーオールとピーク値に交互作用があることを示している。 x_3 の係数 a_3 は負の値となっており、剥離傷と摩耗の両方が発生すると、診断値 Y が相対的に小さくなる。Fig.4 の赤丸で示す軸受を分解調査した結果、剥離傷と摩耗の両方が進行していたが、振動分析結果ではパターン C のオーバーオールは大きくピーク値は小さい結果となった。摩耗が進行してオーバーオールが大きくなると Fig.2 のベースラインが上昇してピーク値が相対的に小さくなる現象をモデルが示唆していると考えられる。また、モデル 2 と 4 において、総回転数を説明変数に追加したが、それぞれモデル 1 と 3 に対して正答率、AUC の改善は見られず、Fig.4 の結果と同様に、損傷因子としての寄与が少ないことがわかった。

4. まとめ

巻上機の軸受の損傷を軽微な段階で診断するために、市場の巻上機と試験装置を用いて正常と損傷有の状態について、振動測定した結果、以下のことがわかった。

- ・市場の巻上機の振動のピーク値やオーバーオールは、総回転数のような寿命因子の影響よりも個々のばらつきが大きい結果となった。
- ・ころ落ち振動やロープからの外乱があるため、ピーク値やオーバーオールだけによる診断は難しい。
- ・ロジスティック回帰分析を用いて巻上機と試験装置のデータを学習させたモデルにおいて、ピーク値とオーバーオールに交互作用を考慮したモデルが正答率、AIC、AUC の観点から最も良い結果となった。

文献

- 1) 木村・新倉・多田・長濱：高速エレベーター用巻上機の軸受発熱低減技術，三菱電機技報 94，5(2020)290.
- 2) 陳山：軸受の損傷による回転機械の振動事例と診断方法，トライボロジスト 61，7 (2016) 431.
- 3) 北井・筒井・谷・坂口：軸受の損傷進展状況と振動特徴量の関係調査，トライボロジー会議 2019 春 東京 F4.