112 ボールねじの超低速逆作動速度における潤滑と摩擦特性及びモデル化

Lubrication, Frictional Characteristics and Modeling of Ball Screw under Ultra-Low Speed of Reverse-Operation

正 砂子田勝昭 (秋田大) 山本 和史 (日本精工)
○学 高木 健次 (秋田大院)

Katsuaki SUNAKODA, 1-1 Aakita University, Tegatagakuenmachi, Akita city, Akita
Kazushi YMAMOTO, NSK Corporation
Kenji TAKAGI, Graduate student Akita University

Key Words : Ball Screw, Stick-Slip, Ultra-Low Speed, Tribology, Thickener, Inverse-Operation, Modeling

1. 序論

ボールねじは原子力発電所等の配管の防振器であるメカニカルスナッパに使用されている。この防振器におけるボールねじの役割は直進運動から回転運動への変換である。この変換を逆作動という。一般にボールねじはスティックスリップ現象(付着-すべり)を生じない⁽¹⁾とされているが、超低速の逆作動運動においてはスティックスリップ現象を生じることがある。ここで超低速とは0.001mm/s以下の速度をいう。ボールねじの低速(58rpm)の正作動における摩擦特性⁽²⁾の研究例はあるが、逆作動における研究例はほとんどない。

本研究では市販の潤滑剤を塗布したボールねじの超低速逆作動実験を行う。増ちょう剤の違いによるボールねじの逆作動運動での摩擦特性の違いを調べることが目的とする。

2. 実験装置及び実験方法

本試験装置は0.1mm/s以下の速度で試験体の圧縮-引張を行うことができる。試験体にはボールねじが使われている。表1にボールねじの諸元を示し、図1に試験装置の概略図を示した。試験体の右側にボールねじの軸方向の摩擦力(抵抗力)を計測するためのロードセル、左側にボールねじの変位を計測するための変位センサを取付けた。直動アクチュエータは速度一定に制御される。本研究で使用した試験体の内部構造を図2に示す。試験体が伸縮すると、ボールねじの作用により回転慣性質量が回転する機構になっている。

Table 1 Ball screw property

Lead	4
Lead angle	5° 1'
Profile of ball groove	Gothic arch
Preload	-

Fig.1 Experimental apparatus

Fig.2 Structure of specimen

市販の潤滑剤11種類を試験潤滑剤としたが、表2に示した潤滑剤の実験結果を取り上げた。試験潤滑剤は増ちょう剤なしの潤滑油と基油が共通の鉱油で増ちょう剤がそれぞれ、リチウム石けん、ウレア系有機化合物の潤滑剤である。図3に各潤滑剤の増ちょう剤の電子顕微鏡写真を示した。

本研究では速度一定に制御しながら、試験体を圧縮-引張することでボールねじの逆作動実験を行った。試験体のボールねじのねじ軸部に塗布する潤滑剤の条件のみを変え、その他潤滑が必要な部分は潤滑剤No.1を塗布した。走行速度は0.0001mm/s (1.5×10^{-1} rpm)である。

Table 2 Sample grease list

Grease No.	Thickener	Grease No.	Thickener
No.1	Li soap	No.2	Urea organic compound

(a) No.1 (b) No.2

Fig.3 SEM image of each of grease

3. 実験結果及び考察

3.1 実験結果

図4にそれぞれの潤滑剤の逆作動速度0.0001mm/sにおける実験結果を示した。増ちょう剤なしの潤滑油での実験結果(図4-(a))は軸方向摩擦力が70~100Nの間で変動しているが、スティックスリップ現象は確認されなかった。増ちょう剤がリチウム石けんの潤滑剤No.2の実験結果(図4-(b))は潤滑油での実験結果と同じ傾向が見られ、ボールねじの軸方向摩擦力が100N前後でほぼ一定の値を示している。増ちょう剤がウレア系有機化合物の潤滑剤No.2での実験結果(図4-(c))は波形がノコギリ状になっておりスティックスリップ現象(三角波の斜辺がスティック時で垂直線がスリップ時である。軸方向摩擦力が急に低下することによりスリップが生じる)が発生している。軸方向摩擦力を最大1600Nまで確認した。実験に使用したすべての潤滑剤において逆作動速度の低下とともに、軸方向摩擦力が増加する傾向となり、増ちょう剤がウレア系の潤滑剤でスティックスリップ現象の発生が確認できた。反対に増ちょう剤が石けん系の潤滑剤ではスティックスリップ現象の発生は確認できなかった。増ちょう剤がウレア系の潤滑剤では逆作動速度が0.001mm/s以下でスティックスリップ現象が生じ始める傾向がある。

(a) Oil

(b) Grease No.1

(c) Grease No.2

Fig.4 Relation between time and displacement, axial frictional force

3.2 考察・モデル化

一般にスティックスリップ現象は摩擦の速度特性が負になると生じやすいと言われており、予備実験によりボールねじの逆作動速度が遅くなるにつれて、摩擦力が大きくなる速度特性が負になる傾向が確認できた。潤滑剤 No.2 で大きな摩擦を生じた原因は摩擦の速度特性が負となったことから、ストライベック曲線の境界潤滑（混合潤滑）領域であると一見考えられる。しかし、逆作動速度の条件を揃えて実験した結果、ストライベック曲線の潤滑油・潤滑剤の粘度が大きいほど、摩擦係数が小さくなることに反し、本研究では潤滑油の摩擦より潤滑剤の摩擦の方が大きくなった。以上のことから境界潤滑領域の理論だけでは本研究のスティックスリップ現象を説明することができない。

増ちょう剤がリチウム石けんの潤滑剤 No.1 や増ちょう剤なしの潤滑油の実験においてスティックスリップ現象の発生が確認できず、また基油が共通な鉱油であることから、潤滑剤 No.2 でスティックスリップ現象が生じた原因は増ちょう剤のウレア系有機化合物にあると推定される。

図 3-(b)のウレア系有機化合物は図 3-(a)リチウム石けんと比べ増ちょう剤自体が硬い性質がある。この性質によりボールねじのねじ溝と鋼球の間に引っかかりが生じ、これが原因でスティックスリップ現象が発生したと考えられる。図 5 に鋼球が増ちょう剤に引っかかるメカニズムのモデルを示す。増ちょう剤のウレアが鋼球との接触部に密集し、くさびとなって玉の進行方向の障害になったと仮説を立てた。図 6 にボールねじのスティックスリップ現象の物理モデルを示す。物体 A, B はそれぞれボールねじと増ちょう剤を表現している。ばね要素 k_p , k_t はそれぞれボールねじの与圧や剛性、増ちょう剤の硬さを表現している。物体 B の山の高さ h は増ちょう剤の高さ・大きさを表現し、 θ はボールねじのリード角の影響を表現している。物体 A は速度一定で x 方向右向きに変位する。 $k_p \gg k_t$, h が小さいとき物体 A は y 方向変位に変位せず、物体 B が y 方向下向きに変位する。このときは移動方向に対して一定（小規模な変動）の抵抗力を示す。一方、 $k_p \leq k_t$, h が大きいとき物体 A が y 方向上向きに変位し、物体 B が変位しない。このとき物体 A の頂点が物体 B の右側の山の頂点に達したとき、 k_p に蓄えられたエネルギーが開放され、物体 A に y 方向下向きの力が加わることで、物体 A が x 方向右向きにすべる。

図 6 のモデルの各パラメータの物理的な意味の検証、及び速度の逆数に比例、または負の減衰の要素の追加が今後の課題となる。

Fig.5 Supposition of wedge

Fig.6 Model of Stick-Slip

4. 結論

- (1) ボールねじの逆作動速度低下につれて、摩擦力が増加しスティックスリップ現象が生じやすくなる。
- (2) 増ちょう剤が石けん系の潤滑剤や増ちょう剤なしの潤滑油では摩擦力が一定を保ち、一方増ちょう剤がウレア系の潤滑剤でスティックスリップ現象の発生を確認した。
- (3) 作成したスティックスリップ現象の物理モデルの各パラメータの物理的な意味の検討が今後の課題である。

参考文献

- (1) Izawa, M., Applied technology of ball screw (in Japanese), (1993), p.21, Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd.
- (2) Ninomiya, M., Friction and Temperature Rise of Ball Screws, NSK Bearing Journal, No.637, P9-16.