キーレスプロペラにおけるテーパ接触面の摩擦に関する一実験*

—第2報：テーパ加工誤差および表面粗さの影響—

川 添 強** 浦 晟**
中 嶋 明** 錦 戸 真 吾***

Experimental Study of Friction at Tapered Surfaces in Keyless Propeller
—2nd Report, Effects of Taper Machining Error and Surface Roughness—

By Tsuyoshi Kawazoe, Akira Ura, Akira Nakashima, Shingo Nishikido

In order to find out a clue to the solution of torque slip problem in keyless propeller, this study investigates the effects of taper machining error and surface roughness on friction behavior of tapered contact. Pushing-up tests were conducted using model propeller boss (AIBC3) and shaft (SF440A).

The experiments revealed that the friction behavior especially grip coefficient is significantly affected by taper machining error compared to surface roughness. Accordingly it is proposed that propeller boss should be pushed up into shaft to the required push-up distance excepting the zone of low grip coefficient.

1. 緒 言

キーレスプロペラが開発されて約25年になる。^{1), 2)}ところが最近, キーレスプロペラにおいてトルクスリップが発生した。前回はこの要因の中から, ボスの弾塑性変形域での摩擦挙動に焦点を絞って実験を行ったが^{3), 4)}, 今回はキーレスプロペラおよび軸の製造上の問題であるテーパ加工誤差と表面粗さが, テーパ接触面の摩擦挙動にどのように影響するか, 新たにグリップ係数を導入して説明を試みた。その結果, テーパ加工誤差は押込み初期に低グリップ係数域を発生させ, トルクスリップを助長しやすいことなど, いくつかの知見を得たので報告する。

2. 実験方法

本実験では, 前報と同じく実際の約1/9縮尺で

基準テーパ1/20のプロペラボス(材質AIBC3)と軸(SF440A)を用いた。Fig.1に供試ボスの断面形状を示す。テーパ加工誤差の影響を調べるために, Fig.2に示すようにボス内面のテーパ1/20.00(表面粗さ約0.4 μ mRa)を基準に, 軸外面のテーパを4種類(約0.5 μ mRa)準備した。また, ボス外面の軸方向に約18mm間隔に7枚のひずみゲージを貼付し, これより求めたボス外面の円周応力の計測値に厚肉円筒理論式を適用して, ボス内面の接触面圧分布を調査した。

次に, 表面粗さの影響を把握するために, 軸の

Fig.1 Cross-sectional view of model boss

* 原稿受付月日 平成9年9月4日

ISME YOKOHAMA '95(平成7年7月18日)

** 正会員 長崎大学(長崎市文教町1-14)

*** 正会員 三菱重工業(株)(長崎市飽ノ浦町1-1)

Shaft taper	A	B	C (mm)	ΔR (mm)
1/20.00	ϕ 81.487	ϕ 74.203	145.65	0.000
1/20.36	ϕ 81.807	ϕ 74.653	145.65	0.065
1/20.51	ϕ 81.650	ϕ 74.650	145.65	0.093
1/20.63	ϕ 81.696	ϕ 74.634	145.65	0.112

Fig.2 Relation between taper of shaft and radial clearance

表面粗さを $0.5\mu\text{mRa}$ (研削)と $13.9\mu\text{mRa}$ (旋削)の2種類準備し、接触面の状態を乾燥状態および油 (Oil32), 固体潤滑剤 (MoS_2), 防錆剤 (Np-19)の塗布状態に分けて実験した。実験では、軸とボスの押込み試験 (軸方向すべり)を行い、押込み量、押込み荷重の計測の他に表面粗さの変化を調べた。

3. 実験結果および考察

3.1 テーパ加工誤差の影響 Fig.3には、テーパ加工誤差による押込み量と押込み荷重の関係を示す。グリップ係数 C_g と摩擦係数 μ は、前者が見かけの接触面積 A_p を使用しているのに対し、後者は幾何学的真実接触面積 A_r を考慮し求められる。従って、実機のプロペラ押込み作業では、 C_g を基準に押込み精度の良否が決定されていることになる。

$$C_g \doteq \frac{F_p}{pA_p} - \tan\alpha$$

A_p : ボスと軸のテーパ部全体が接触すると仮定したときの面積

F_p : 押込み荷重 p : 接触面圧 α : テーパ角度

$$\mu \doteq \frac{F_p}{pA_r} - \tan\alpha$$

A_r : テーパ加工誤差による接触長さを幾何学的に求めたときの接触面積 (幾何学的真実接触面積)

Fig.3よりボスと軸のテーパが1/20.00で一致している場合、すなわちテーパ加工誤差がない場合のグリップ係数は約0.15であることが分かる。

これは $A_p = A_r$ のため、前報³⁾の乾燥状態の摩擦係数とほぼ同値である。軸テーパ角度が小さくなる (ΔR が大きくなる)につれて押込み初期にグリップ係数が低下 (たるみが発生)し、その後押込

Fig.3 Pushing-up distance, load and grip coefficient by changing taper

Fig.4 Coefficient of friction by changing taper

み量の増加とともにグリップ係数が増加している。このような低グリップ係数域の出現は、テーパ加工誤差による接触面積の減少によるものである。また、その後のグリップ係数の増加は、軸とボスの幾何学的真実接触面積の拡大による押込み荷重の増加に起因する。なお、軸テーパが1/19.64から1/19.51および1/19.39とテーパ角度を逆に大きくした実験でも、同様に低グリップ係数域が見られた。

Fig.4は、テーパ加工誤差による押込み量と摩擦係数の関係を示す。接触面が乾燥状態での摩擦係数は、軸テーパ角度が変化しても0.13～0.20の範囲にある。従って、テーパ加工誤差はグリップ係数に直接影響するが、摩擦係数にはほとんど影響しないことが分かる。このことは、空气中乾燥状態の摩擦係数が主に接触する材料間の凝着性で決まることと整合する。

Fig.5およびFig.6には、テーパ加工誤差によるボス内面の接触面圧分布の変化を示す。接触面圧は、ボス外面の円周応力の計測値に厚肉円筒理論を適用し求めた。軸テーパ1/20.00の接触面圧は、ボス前端部のフランジ厚さの影響が見られるものの、ボス全長ではほぼ様な分布となる。一方、軸テーパ1/20.36の場合は、押込みにより軸がボス後端部から接触し始めるため接触面圧はボス後端部が高くなり、押込み量が増加するにつれて接触域がボス前端部側に広がる。このようにテーパ加工誤差は、片あたり現象を引き起こし、ボスに局所的に大きな応力を発生させ、早期にボス内面の降伏を招くため強度の面からも好ましくない。なお、上述の低グリップ係数域の発生と接触面圧分布は、高井のFEMによる解析結果⁵⁾とほぼ一致することが確認されている。

ここでは、極端なテーパ加工誤差を用いて押込み試験を行ったが、実機のプロペラでもテーパ加工誤差や表面微小突起部の降伏に起因して、押込み量1mm程度の低グリップ域が発生することが多い。しかも、最近ではボスの薄肉短小化により、許容押込み量の上限值と下限値が著しく狭くなり困難な押込み作業となっている。さらに困難さは増すが、トルクスリップ防止の観点からすれば、Fig.7に示すように低グリップ係数域を除いて規定押込み量(P点→Q点)まで押込むことが重要と考える。また、キーレスプロペラのポイントが、適正なグリップ力(接触面圧)の発生にあることを考えると、現在の押込み量とグリップ係数の管理の他に、ボス外面の微小変形量の計測を試み、データを蓄積して健全な押込み作業の目安とすることも有効と思われる。

3.2 表面粗さの影響 Fig.8およびFig.9にはグリップ係数に及ぼす表面粗さの影響を調べるために、乾燥状態(Dry)および油(Oil32)、固体潤滑剤(MoS2)、防錆剤(Np-19)の塗布状態での押込み試

Fig.5 Distribution of contact pressure at taper 1/20.00

Fig.6 Distribution of contact pressure at taper 1/20.36

Fig.7 Supplement of pushing-up distance
(A) Ideal pushing-up operation without error of taper
(B) Actual pushing-up operation with error of taper

験結果を示す。乾燥状態を比較すると、Fig.8の研削軸（表面粗さ $0.5\mu\text{mRa}$ ）のグリップ係数は約0.15で、Fig.9の旋削軸（ $13.9\mu\text{mRa}$ ）の場合は約0.13と後者がわずかに低い。これは後者の表面粗さが大きい分だけ初期の真実接触面積が狭く、前者より低荷重で押込まれるためと推定される。この実験結果より、接触部の表面粗さを大きく変化させても、テーパ加工誤差で見られたような低グリップ係数域はほとんどないことが分かる。

次に表面状態に注目すると、研削軸のグリップ係数はDryおよびOil32、 MoS_2 、NP-19の順に減少するが、旋削軸の場合はDry、Oil32、 MoS_2 がほぼ同一値を示す。このことから旋削軸の表面粗さが大きい場合は、微小突起部での接触面積が非常に小さく、高い接触面圧が発生して潤滑剤が接触面より排除され、Dryと同じグリップ係数になることが推定される。一方、NP-19は旋削軸でも0.02の

低いグリップ係数を示し、押込み量が増加しても金属表面に強く接着して金属間の直接接触を妨げ、トルクスリップを助長しやすいことが分かる。この防錆剤はプロペラ軸等に広く使用されているため、押し込み前の完全除去が必要である。

参考までに、旋削軸を用いて乾燥状態での押し込み引抜き試験を30回繰り返したときの表面粗さを、Fig.10に示す。その結果、試験前と比べて軸の表面粗さ(Ra)はほとんど変化していないが、ボスの表面粗さは半減している。表面粗さの特性を表わすアボット負荷曲線⁶⁾をみると、その変化が明瞭である。これは、軸旋削時の表面加工硬化により軸(Hv170→Hv195)とボス(Hv160)の硬度差が大きくなり、繰り返しの押し込み引抜きによってボス表面の微小突起部が降伏または削り取られたためと言える。なお、グリップ係数は、1回目および30回目とも大差なく0.13～0.15の範囲内にあった。この実験の主眼は“繰り返しの押し込み引抜きによるあ

Fig.8 Grip coefficient of ground shaft with dry, lubricants and anti-rust agent

Fig.9 Grip coefficient of turned shaft with dry, lubricants and anti-rust agent

(a-1) Shaft before pushing-up test

(a-2) Shaft after pushing-up test of 30 times

(b-1) Boss before pushing-up test

(b-2) Boss after pushing-up test of 30 times

Fig.10 Surface roughness of shaft and boss before and after repeated pushing-up tests

たり率の改善”，即ちグラインダーによるあたり付け手作業をできるだけ省略することであったが，実作業への適用にはまだ問題が残る．

4. ま と め

キーレスプロペラを対象としたキーレステーパ接触面の摩擦試験を行った結果，次の点が明らかにされた．

(1) キーレスプロペラの押込み時における摩擦拳動(特にグリップ係数)は，表面粗さよりもテーパ加工誤差に大きく影響を受け，軸とボスのテーパ加工精度が重要となる．

(2) 押込み量の設計計算では，テーパ加工誤差は考慮されていないため，押込み作業において低グリップ係数域が発生したら，これを除いて規定押込み量まで押込むことが望ましい．

最後に，本実験に協力いただいた山口啓君(NOK(株))，内藤健一郎君(NTN(株))，山本剛君(THK(株))に深く感謝する．

参 考 文 献

- 1) 川添強，稗田信行：日本舶用機関学会誌，9.10(1974)9
- 2) T.Kawazoe, H.Kishikawa:Mitsubishi Technical Bulletin, 108(1976)1
- 3) 川添強，浦晟，錦戸真吾，山口啓：日本舶用機関学会誌，31,10(1996)775
- 4) T.Kawazoe, A.Ura, S.Nishikido:Proceedings of ISME'95, Vol.2(1995)419
- 5) 高井元弘：日本舶用機関学会，第54回学術論文集206(1994)81
- 6) I.M.Hutchings:Tribology published by ARNOLD(1992)10