キーレスプロペラテーパ接触部の力学的挙動のシミュレーション*

高井元弘**

Stress Analysis on Tapered joint Surface of Keyless Propeller by Computer Simulation

By Motohiro Takai

The process of pushing-up and torque slip test of 1/20 taper joint in keyless propeller are simulated by the incremental finite element analysis. The simulation model is described by the axisymmetric quadrilateral element and Coulomb friction is requested between the tapered propeller boss surface and shaft. Coefficient of friction of 0.16 is associated with dry contact condition and that of 0.05 is associated with lubricated contact condition.

The propeller boss, AlBC3, is treated as an work hardening material and shaft, SF440, is treated as elastic perfectly-plastic material. It is found that the simulation results agree well with the experimental results and can estimate the relation between push-up load and push-up distance, the slip torque of taper joint, the stress distribution of tapered boss surface and shaft surface.

1. はじめに

キーレスプロペラや動力伝達軸の継ぎ手フランジなどでは、テーパ結合や焼きばめによる結合が使われている。いずれも面の接触部の摩擦力により動力が伝達されるもので、キー方式に比べ構造が簡単なだけでなく、キー溝切欠き部の応力集中による強度低下がないなどの利点がある反面、接触面の圧入しる、加工仕上げ、擦り合せなどの圧入設計や圧入工程管理に高度な技術を必要とする。

現在、固定ピッチプロペラ船ではほとんどの場合テーパ軸にプロペラボスを圧入してプロペラを取り付けるキーレス方式が採用されており、その信頼性の高さは周知の通りであるが、トルクスリップなどのトラブルの発生は皆無ではなく、圧入工程管理の問題や過大な負荷によるものと推定されている。

キーレスプロペラ方式については、圧入部の信頼性の確保や、圧入工程の簡略化によるコストダウン、軸系の軽量化、効率向上のため圧入部の肉厚や接触面の長さの減少化の検討などのため、実

機プロペラを用いた押込み試験やトルクスリップ試験⁽¹⁾、縮尺モデルを用いたテーパ部の加工誤差や表面粗さの影響、接触面における摩擦係数の影響などに関する研究結果が報告されている^{(2)・(3)}。

実機サイズでの試験は労力と費用の面で困難が伴い、縮尺モデルを用いた場合では、接触面における力学的挙動の相似則の問題など実機との相関性について明らかにすべき点が多いと考えられる。

数値的手法を使った仮想的な実験は実機とモデルの関係を明らかにする上で有力な手法と考えられる。そこで、本報告では、実機プロペラボスを対象としてテーパ軸への押込み過程から押込み後のトルクスリップまでの過程を有限要素法(FEM)によりシミュレーションし、ボスと軸のテーパ接触部の力学的挙動について検討した結果について報告する。

2. シミュレーションの方法

2.1 解析対象プロペラボス 数値シミュレーションの対象としたプロペラの要目とプロペラボスの形状を表1、図1にそれぞれ示す。プロペラボスと軸のテーパは0.05とし、解析モデルでは、プロペラ翼は簡単化のため省略した。プロペラボ

*原稿受付 平成10年6月10日

**正会員 運輸省船舶技術研究所 (三鷹市新川6-38-1)

ス材料はNi-Al青銅(AIBC3)，ターパ軸は炭素鋼鍛鋼材(SF440)の中空軸とし，それぞれの材料定数を表2に示す。

表1 解析対称プロペラ要目

主機出力	26100	PS
回転数	122	rpm
プロペラ直径	6800	mm
所要押込み量	13	mm
プロペラ材質	Ni-Al	Bronze

図1 プロペラボス断面形状

表2 解析に使用したモデルの材料特性値

材料	縦弾性係数 (MPa)	引張強度 (MPa)	ポアソン 比	降伏応力 (MPa)	伸び (%)
AIBC3	1.18×10^5	700	0.34	245	18
SF440	2.06×10^5	500	0.3	275	30

材料の弾塑性変形域の特性は軸材料については弾完全塑性材料とし，プロペラボス材料はひずみ硬化形の材料として，応力-ひずみ曲線のひずみ硬化率 $\partial \sigma / \partial \epsilon^P$ は(1)式で示されると仮定した。

$$\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon^P} = nA(1 + \epsilon^P)^{n-1} \quad (1)$$

ただし， σ は全応力， ϵ^P は塑性ひずみ成分であり， $A=241.9\text{MPa}$ ， $n=6.42$ とした。

2.2 シミュレーションのモデル FEMシミュレーションモデルを図2に示す。押込み過程では，押込み荷重Pをプロペラボス船尾側端部に均一に加わる分布荷重として，Pをゼロから最大押込み荷重まで徐々に増大させ後，荷重を開放した。

プロペラボスに加わるトルクによりボスがターパ軸との接触面で回転するトルクスリップ過程で

はプロペラボスを一定量の押込んだ後，ボス外周のFEM要素にトルクを節点荷重として加え，トルクを段階的に増大させた。ボスの円周方向変位が大きくなり，FEMの解が発散した時の荷重をスリップトルクとした。

FEM要素は軸対称4角形要素を用い，軸とボスの境界面の要素間には摩擦力として接触面圧に比例するクローン力が働くとし，摩擦係数はドライ押込み時は0.16，ウェット状態では0.05と仮定し，それぞれ一定とした。また，押込み量を増大させ，材料の弾性限をこえた時の材料の降伏条件はミーゼスの条件式に従うとした。

3. シミュレーション結果について

図2 FEMシミュレーションモデル

3.1 押込み荷重と押し込み量の関係 図3にFEMシミュレーションにより得られたドライ押込み(摩擦係数 $\mu=0.16$)とウェット押込み($\mu=0.05$)における押込み量と押込み荷重の関係を示す。

押込み量は船尾側ボス端面の軸方向変位量としており，摩擦係数の小さいウェット押込みでは小さい荷重で押込み量が大きくなる現象を再現している。押込み量と押込み荷重の関係は押込み量30mm位までは直線の関係を示しているが，さらに押込み量が大きくなると，押込み荷重は減少する傾向を示す。これは押込み量が大きくなるにつれて，ボス内面の応力が増大し塑性変形領域になるためと考えられる。図4，図5に押込み過程において押込み量がモデルとしたプロペラボスの所要押込み量に近い15mmとした時のプロペラボス内面とターパ軸との接触面における垂直応力成分 σ_z

図3 押込み量と押し込み荷重の関係

図5 ウェット押込み過程でのボス接触面応力分布

図4 ドライ押込み過程でのボス接触面応力分布

図6 押込み荷重開放時のボス接触面応力分布

(接線方向応力), σ_x (軸方向応力), σ_r (半径方向応力), せん断応力成分 τ_{xr} の応力分布をドライ押込み及びウェット押込みの場合についてそれぞれ示す。せん断応力成分 $\tau_{r\theta}$, $\tau_{\theta x}$ は軸対称モデルであるため一定で0である。横軸は船尾側のボス端部から船首側への軸方向位置を示す。押込み量は同じであるが、ドライ押し込み時では $28.15 \times 10^6 \text{ N}$ 、ウェット押し込み時では $15.34 \times 10^6 \text{ N}$ の押し込み荷重がプロペラボスに軸方向荷重として働いている。

大きな押込み荷重と摩擦力が働くドライ押し込み時には軸方向圧縮応力 σ_x 、せん断力 τ_{xr} の分布はドライ押し込み時に比べ大きな値となっているが、 σ_θ 、 σ_r の大きさ、分布はほとんど変わらず、ドライ押し込み、ウェット押し込みに関わらず、押込み量により決まることを示している。

図6に押込み量15mmで押込み荷重を開放した時

点でのプロペラボス内面の接触面での応力分布を示す。 σ_x 、 τ_{xr} の値はプロペラボスの前後の端部近傍以外は無視できる値となっている。 σ_r はボスの両端部を除きほぼ一定であるが、 σ_θ はボス内面の船尾側から船首側に徐々に減少して行く分布を示している。

3.2 塑性領域について 押込み量が大きくなると、プロペラボス内面の変形が増大し、材料の塑性変形領域に入る。シミュレーション結果では、最初にプロペラボス内面前後の端部に塑性変形領域が発生するが、押込み量の増大に伴い、船尾側ボス端部よりボス内部に広がって行く。図7に塑性変形領域が最初にボステーパ接触面の内面全体に広がった時の塑性ひずみ ϵ_θ^p 、 ϵ_r^p 、 ϵ_x^p 、 ϵ_{xr}^p の分布を示す。図8には、その時のボス内面の接触面における応力分布を示す。押込み量は32.3mmで、いずれもドライ押し込み時の場合である。塑性

図7 過大押込み時のボス接触面塑性ひずみ分布

図8 過大押込み時のボス接触面応力分布

ひずみは船尾側が大きい分布となっているが、ボス内面の応力分布については、 σ_θ がボスの船首側が大きくなり、弾性変形領域での傾向と異なる。

圧縮応力となる σ_r は船首側ボス端面の比較的大きい範囲で大きくなることを示している。

3.3 トルクスリップ過程の解析 図9にトルクスリップシミュレーションにより得られた押込み量とスリッパトルクの関係を示す。一定量の押込み後、押込み荷重を開放し、トルクを徐々に増大させ、ボスがテーパ軸との接触面で回転を始めた時のトルクを求めたものである。トルクスリップにたいする接触面での摩擦係数は0.16と仮定した。押込み量が増加すると共にスリッパトルクも増大するが、徐々にスリッパトルクの増加の割合は低下する。スリッパトルクは押込み量が増大するにともない、ボス内面が塑性変形領域に入る

図9 押込み量とスリッパトルクの関係

ことにより、最終的に一定値(最大スリッパトルク)に収束すると考えられる。

図9より、本モデルの場合最大スリッパトルクは $14.0 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ 程度と推定される。シミュレーションのモデルとしたプロペラボスの定格のトルクは約 $1.323 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ でありこの値をスリッパトルクとするためには、押込み量は約1.6mm必要となる。モデルとしたプロペラボスをキーレスプロペラとした場合の所要押込み量を13mmとすると、スリッパトルクは約 $7.742 \times 10^6 \text{ N} \cdot \text{m}$ となり、定格時のトルクの約5.8倍となり、実機による検討結果①とほぼ一致する。また、最大スリッパトルクは、定格のトルクの約10.6倍となる。

3.4 テーパ軸接触面の応力 図10に押込み量をモデルプロペラの所要押込み量13mmとしたときのテーパ軸表面の軸方向応力分布を示す。横軸は船尾側から船首側にむけての軸方向位置を示す。プロペラボスとの接触部では σ_θ 、 σ_x 、 σ_r の垂直応力成分はすべて圧縮応力となり、 σ_r が最も大きく、船首側ボス端部の接触部で76MPaとなっている。

押込み部をはずれたボス端部外側近傍では σ_θ 、 σ_x が引張応力となり、軸方向応力 σ_x が最も大きく10MPa程度となっている。また、船尾、ボス両端部内側近傍でピーク値が25MPaと比較的大きいせん断応力 τ_{xr} が分布している。プロペラ軸のプロペラボスの船首側取り付け部における軸方向応力はプロペラ軸に作用する変動曲げモーメントによる疲労破壊の発生に影響を与えられている。圧縮応力は疲労強度を向上させる方向に働くが、引張応力は疲労強度を低下させると考えられる。押込み量の増大はボス端部外側近傍の軸方向

図10 テーパ軸表面応力分布

図11 過大押込み時のテーパ軸表面応力分布

引張応力を増大させる可能性がある。図11はボスの押込み量を35mmと大きくした時のテーパ軸表面の軸方向応力分布を示す。押込み量が大きいためにボス内面は完全に塑性変形領域に達していると考えられる。テーパ軸強度に影響を及ぼすと考えられる船首側ボス端部外側近傍のテーパ軸表面での引張応力 σ_x は20MPa程度の比較的小さい値となっており、テーパ軸の強度に及ぼす影響は少ないと考えられる。しかし、ボス端部内側近傍の接触面における垂直応力成分は σ_r が167MPa、せん断応力 τ_{xr} が60MPaと増大しており、変動荷重が作用した時のボスと軸の間でのフレット疲労の影響を検討する必要があると思われる。

4. ま と め

実機キーレスプロペラボスとテーパ軸をモデル

としてボス押込み過程、トルクスリップ過程の力学的挙動を明らかにするため、テーパ接触面に働くクーロン摩擦力が一定であるという仮定のもとで、FEMを用いて数値シミュレーションを行った。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 押込み過程のシミュレーションでは、プロペラボス材料の弾塑性特性を考慮したモデルにより、ドライ押し込み時(接触面での摩擦係数 $=0.16$ と仮定)とウェット押し込み時($\mu=0.05$ と仮定)について、ボスのテーパ接触面が塑性変形領域の変形に至までの、押込み量と押込み荷重の関係を求めることができた。

(2) トルクスリップ過程のシミュレーションにより、モデルとしたキーレスプロペラボスの場合、所要押込み量では、モデルとしたプロペラ定格トルクの約5.8倍のスリップトルクが得られた。また、最大スリップトルクは、定格トルクの約10.6倍と推定された。

(3) プロペラボスの押込みによりボス端部外側近傍のテーパ軸表面に発生する軸方向応 σ_θ は過大な押込み状態でも比較的小さく、軸の疲労強度に及ぼす影響は無視できると考えられる。しかし、ボス端部内側の応力集中部で軸表面の圧縮応力 σ_r とせん断応力 τ_{xr} は大きくなる傾向にあり、フレット疲労の発生に対する影響を検討する必要があると思われる。

参 考 文 献

- 1) 稗田ほか3名, 舶機誌, 9-10(昭49-10), 909
- 2) 川添ほか3名, 舶機誌, 31-10(平8-10), 775
- 3) 川添ほか3名, 舶機誌, 33-1(平10-1), 23

~~~~~ メ ャ ッ ジ ~~~~~

近い将来、力学的現象はすべてコンピュータによる数値実験—いわゆるバーチャル実験—でかたがつくと言われていきます。そのせいか、当研究所でも所内ラン、計算サーバ、ネットワークコンピュータの整備が進み、実際に試験機の動く音を聞くことが少なくなってきた気がします。私も昔ながらの疲労試験のかたわら、この真似事をしています。足腰が弱り、少々目が遠くなくても平気ですら年寄り向きだと思っていましたが、ハードとソフトの進歩の速さと無駄な? 情報量の多さに悪戦苦闘しているのが実状です。