

氏名	張 国偉 (中国)
学位の種類	博士(工学)
学位記番号	工博甲第479号
学位授与の日付	令和元年9月20日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当
学位論文題目	Mechanism Clarification of Coming out of the Shaft from Shrink-Fitted Ceramic Sleeve Roller under Bending Load Focusing on the Driving out Force (抜け出し駆動力に注目した曲げ荷重を受けるセラミックスリーブ式焼嵌めローラーの軸抜け出しメカニズムの解明)
論文審査委員	主査 教授 野田 尚昭 " 秋山 哲也 " 赤星 保浩 " 松田 健次 技術顧問 佐野 義一(丸栄化工株式会社)

## 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

Ceramic sleeve rollers have been developed recently to be used in steel manufacturing industries efficiently. Ceramics have high corrosion resistance, high heat resistance and high wear resistance. The ceramic cylinder and the steel shafts of both ends are joined together to form the ceramic sleeve roller. It is found that the shrink fitting method is the most suitable connecting method for the roller. However, since only small shrink fitting ratios can be applied due to the brittleness of the ceramics, coming out of the shaft from the sleeve was reported during repeated loadings.

This new failure should be analyzed and prevented. Previously, the finite element method was used to analyze the coming out behavior. Then, the roller rotation was replaced by the load shifting on the fixed roller by the finite element method. Since the calculation time was very enormous, only few rotation cycles were conducted. To realize much more number of loading cycles to investigate the coming out mechanism, therefore, a two-dimensional simulation was conducted to reduce the calculation time and more than  $N = 40$  cycles were investigated. Those studies have proved that the coming out behavior can be numerically realized on the two-dimensional and three-dimensional simulations, while few studies have been focused on clarifying the coming out mechanism and analyzing the driving out force generated on the shaft, which is also very important for the future design of the roller without coming out. This thesis is composed of total of 5 chapters and organized as follows.

Chapter 1 gives an introduction of the coming out problem of the shaft from the ceramic sleeve and the finite element method. Also gives an overview of previous studies on the coming

out phenomenon. Then research purpose of this thesis is introduced, focusing on clarification of the coming out mechanism of the shaft from the ceramic sleeve and analysis of the driving out force generated on the shaft under bending load.

In Chapter 2, to find out the coming out mechanism of the shaft from the sleeve with less computational time in a much more understandable way, a simplified two-dimensional model with a newly designed stopper is used to investigate the coming out mechanism. The two-dimensional shrink-fitted structure is considered by replacing the shaft with the inner plate and by replacing the sleeve with the outer plate. The inner plate gradually comes out until it is stopped by the stopper under the standard simulation condition. This is because driving out force  $F_d$  is generated on the inner plate when the alternate load is applied and drives the shaft out gradually. Then the generation mechanism of driving out force is clarified with the help of the stopper. And  $F_d$  is also calculated. It is essential to calculate out the driving out force  $F_d$  to guide the design of the real model for the future study. Finally, the process of coming out is explained in terms of the residual displacement based on the deformation and the displacement of the inner plate (shaft) under a new loading method.

In Chapter 3, before investigating the effects of the design factors on the driving out force by an actual three-dimensional model, it is useful to perform the analysis by a two-dimensional model. The effect of the shrink fitting ratio  $\delta/d$  on the driving out force  $F_d$  of the inner plate (shaft) is investigated and discussed as well as several other parameters, such as load  $P$ , friction coefficient  $\mu$ , shrink fitting ratio  $\delta/d$ , shrink fitting length  $l$ , Young's modulus of the inner plate (shaft)  $E_{in}$ . When designing an actual three-dimensional roller, it is sufficient to find the maximum value of the driving out force  $F_d$  and based on this value for the strength design of the structure for prevention of the coming out phenomenon.

In Chapter 4, the actual three-dimensional model is considered to explore the coming out mechanism and to calculate the driving out force  $F_d^{3D}$ . Here, a novel Ball-stopper installed outside of the shaft designed for the three-dimensional model originally fertilising the analysis of the generation mechanism of driving out force  $F_d^{3D}$  and the calculation of  $F_d^{3D}$  is introduced. The function of this kind of Ball-stopper is firstly proved by comparing with the two-dimensional model with an inner stopper used in Chapter 2 and Chapter 3. Then the generation mechanism of driving out force  $F_d^{3D}$  is clarified and  $F_d^{3D}$  is calculated out with

the help of the Ball-stopper.

Finally, Chapter 5 provides the major conclusions, the most significant outcomes and contributions and suggestions for future works.

## 学位論文審査の結果の要旨

セラミックスリーブ式焼嵌めローラーは、高い耐食性、耐熱性および耐摩耗性を有するため、鉄鋼産業で効率的に使用できる。その接合には最適と判断される焼嵌め法により、セラミック製スリーブの両端にスチール製シャフトが焼嵌めされ、スリーブ式ローラーを構成する。しかし、セラミックスが脆性材料のため、小さな焼嵌率しか適用できず、稼働中にスリーブからシャフトが抜け出す、新しいタイプの損傷が報告されている。この現象を解明するため、これまでも数値シミュレーションによって考察がなされており、特に実物のローラーの解析時間が膨大となるため、現象を2次元モデルで表現することで、多数回の荷重繰り返しを考察された。一方で、シャフトに作用するのは、引き抜きではなく、曲げ荷重であり、抜け出し方向に外力は存在しない。それにもかかわらず、軸の抜け出しがなぜ生じるのか、定量的な説明がなされていない。

そこで本研究では、解析モデルにおいて、抜け出しを妨げるストッパーを新たに設定することで、接触時の反力に注目している。すなわち、ストッパーの反力は抜け出し駆動力と釣り合うので、反力の大きさは抜け出し駆動力そのものである。この論文では、この抜け出し駆動力に注目して、シャフトの抜け出し現象を考察している。この論文は全部で5つの章で構成されており、以下のよう

に構成されている。

第1章では、セラミックスリーブからシャフトが抜け出す問題を紹介するとともに、数値シミュレーションによる以前の研究の概要を説明している。次に、この論文の研究目的を紹介し、シャフトに発生する駆動力に注目することで、セラミックスリーブからシャフトが抜け出す機構の解明を行うことを述べている。

第2章では、繰り返し曲げ荷重負荷によるシャフトの抜け出し現象を解明する新しいモデルを説明している。少ない計算時間で解析するため、シャフトをインナープレートで置き換え、スリーブをアウタープレート置き換えた、2次元モデルを取り上げ、抜け出しを途中で妨げるストッパーを新しく提案している。その結果、インナープレートは繰り返し曲げ荷重によって徐々に抜け出す、ストッパーに接触することで抜け出しが妨げられる結果が得られることや、その際、ストッパーの接触力は、抜け出し駆動力そのものとみなし得ることを説明している。

このようなストッパー付きのモデルによって、軸の抜け出しのシミュレーションを行い、以下を明らかにしている。インナープレートがストッパーと接触するとき、抜け出し駆動力はストッパーの反力と釣り合っている。このとき、インナープレート上下面の摩擦力の和が駆動力となることを明らかにしている。よって、繰り返し曲げ荷重が作用するときの軸の抜け出し現象は、インナープレート側面の摩擦力の総和として抜け出し駆動力が発生し、徐々にシャフトを押し出すためと考えることができる。

また、繰り返し曲げ荷重の中間すなわち荷重0を保持するインターバルを与える負荷モデルを考慮に、抜け出し現象を考察している。すなわち曲げ荷重を与えた後、荷重を除荷した荷重0のインターバルでは、インナープレートは過重負荷前の位置に戻ろうとする。しかし、完全に戻ることができずに抜け出し変位が残留する。すなわち、軸の抜け出し過程は、繰り返し曲げ荷重によって生じるシャフトの繰り返し変形の際に、残留変位が存在することと、その残留変位が曲げの繰り返しにより、蓄積していくことで説明できることを、説明している。

第3章では、インナープレートの抜け出し力に対する設計上考慮すべき諸因子の影響を調べている。すなわち、焼嵌め率、繰り返し曲げ荷重の大きさ、接合面の摩擦係数、焼嵌め接合部の長さ、

シャフトのヤング率などの各種パラメータの抜け出し駆動力の影響について検討し議論している。その結果、各種パラメータが局所的に大きな抜け出し駆動力を与えることを明らかにしている。本研究で用いたモデルは2次元モデルであるが、実際の3次元スリーブロールの軸の抜け出しの防止対策としては、抜け出し駆動力が最大となる場合を把握し、それに耐えうるストッパーを設計すれば十分であることを説明している。

第4章では、実際のスリーブ式ローラーの軸の抜け出し現象を、3次元のモデルを用いて再現している。曲げ荷重下で回転するローラーにおける抜け出し問題では、ストッパーや焼嵌め面の接触位置が回転中に3次元的に変化する。ここでは、シャフトの外側端面に設置された新しいボールストッパーを考案し、この新モデルを用いて、実際のローラー駆動力を求めることに成功している。また、スリーブとシャフトの焼嵌め面に生じる摩擦力もローラーの回転によって複雑に変化するが、2次元モデルで得られた知見を利用して、駆動力の発生メカニズムを考察している。

最後に、第5章では、主要な結論ならびに最も重要な成果をまとめている。

以上のように、本論文では抜け出し方向に外力が作用しない曲げ荷重負荷において、なぜ軸の抜け出し現象が生じるのか、その駆動力に注目して、メカニズムを考察している。また、シャフトの抜け挙動における各種設計要因の影響を考察した本研究の知見は、実際のセラミックスリーブ式焼嵌めローラーの設計ならびに信頼性向上に貢献するものである。よって本論文は博士（工学）の学位論文に値するものと認められる。

なお、本論文に関し、審査委員並びに公聴会出席者からは、解析モデルの設定、抜け駆動力が最大となる条件、シャフトの傾きと移動、駆動力の測定位置、モデルが異なる場合の影響などについて詳細な質問がなされたが、いずれも適切な回答がなされた。

以上により、論文審査及び最終試験の結果に基づき、審査委員会において慎重に審査した結果、本論文が、博士（工学）に十分値するものであると判断した。