

氏名	LIU Xi (中国)
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	工博甲第505号
学位授与の日付	令和2年 9月25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	ピッチ差を有するボルト・ナット締結体のねじ込みと締め付け過程の3次元有限要素法解析 (Three-Dimensional Finite Element Analysis of Screwing and Tightening Processes of Bolt and Nut Connections with Slight Pitch Difference)
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

### 学 位 論 文 内 容 の 要 旨

ボルト・ナット締結体は、使用頻度、重要度が高い機械要素であり、低価格であることから、例えば自動車1台に3000本程度使用されるなど、幅広く使用され、標準化が行われている。しかし、ボルト締結体に衝撃や振動等の動的外力が作用すると、その大きさによって、ねじの螺旋形状に基づく戻り回転力がボルト・ナットねじ面間の摩擦力を上回る場合があり、締結力を失いその機能を果たさなくなる。その結果、現在でも車両や航空機等において緩みに起因する事故が散発している。そのため、緩みにくく破損しにくいボルト締結体が依然として求められており、これまでも多くの緩みの発生とその防止に関する研究や疲労強度の向上に関する研究がなされてきた。

耐疲労・耐緩みを向上させる研究として、ピッチ差を設けたボルト・ナット締結体は古くから提案されていた。しかし、それを実証した研究はほとんど見当たらなかった。そこで、著者らは先に適切なピッチ差を与えることで緩み防止効果が得られることを示すとともに、疲労実験によって、ある範囲のピッチ差では疲労寿命も向上させ得ることを示した。さらに、軸対称有限要素法(FEM)解析によって、ねじ谷底の応力を求め、ピッチ差による疲労強度向上のメカニズムを考察した。

一方、ボルト破損の主要因は、ナットの緩みに関係することはよく知られている。そこで著者らは、緩み止め効果を評価する上で、ナットのねじ込み過程におけるプリベリングトルクが密接に関係することを実験的に明らかにしてきた。ナットにおけるプリベリングトルクの解析には、螺旋系のねじ形状を有するモデルを用いる必要があり、ねじ底の応力解析に用いた軸対称 FEM モデルに代わって、三次元 FEM モデルで解析する

ことになる。

そこで、本研究では、「ねじ込み過程」におけるプリベリングトルクの詳細な挙動を実験的に把握するとともに、3次元有限要素解析によるプリベリングトルクのシミュレーションを試みる。また、「ねじ込み過程」に続く緩みに直接関係する「締め付け/緩ませ過程」における締結力  $F$  と締め付けトルク  $T$  の発生過程とその大きさを3次元 FEM 解析により求め、実験で得られた結果と比較してピッチ差による影響を明らかにする。

第1章では、ボルト・ナット締結体の現状と問題点について述べている。また今まで行われてきたボルト・ナット締結体の研究と本論文の内容を比較し、紹介する。

第2章ではナットと締結物が接触する前にナットに生じる、ねじ込み抵抗トルクすなわち、プリベリングトルク  $T_p$  について考察する。具体的には、「ねじ込み過程」と「ねじ戻し過程」について実験と解析の両面からプリベリングトルク  $T_p$  を求めて、緩み止め性能について考察する。

第3章では、正確なピッチ差の求め方について述べている。このピッチ差付きナットはわずかなピッチ差の誤差で緩み止め性能に影響を及ぼす。実験と解析の結果が一致しない原因として、このピッチ差の誤差が影響していると考えたが、ピッチ差の誤差をなくすことは現実的に不可能である。そこで比較的容易な測定方法によって加工後のピッチ差の誤差を正確に評価することを可能にした。

第4章では、ピッチ差付きナットについて、「ねじ込み過程」に続くナットと被締結物が接触した後の「締め付け過程」を取り扱った。3次元 FEM 解析により締結力  $F$  と締め付けトルク  $T$  の発生過程とその大きさを求め、実験で得られた結果と比較してピッチ差による影響を明らかにした。また、締め付けに続き、問題の「緩み過程」を模擬する実験・解析条件「緩ませ過程」における締結力  $F$  とトルク  $T$  の関係も考察した。ピッチ差  $\alpha$  を大きくすると、プリベリングトルク  $T_p$  だけでなく、残留プリベリングトルク  $T_p^\mu$  も増加することを、実験と解析で明らかにした。これにより、ピッチ差付きナットは緩み止め性能において優れていることが示唆される。また解析により、締め付け、緩ませ過程における、締結力  $F$  と締め付けトルク  $T$  の通常ナットとの違いを考察し、ピッチ差付きナットの特徴をより明確にする。

第5章は総括であり、本研究で得られた主要な結論を要約する。

## 学位論文審査の結果の要旨

ボルト・ナット締結体は、使用頻度、重要度が高い機械要素で、幅広く使用されている。しかし、ボルト締結体に衝撃や振動等の動的外力が作用すると、その大きさによって、ねじの螺旋形状に基づく戻り回転力が、ボルト・ナットねじ面間の摩擦力を上回る場合があり、締結機能を喪失する。その結果、現在でも緩みに起因する事故が散発しており、緩みにくく破損しにくいボルト締結体が依然として求められている。よって、緩みの発生とその防止に関する研究や疲労強度の向上に関する多くの研究が行われ、ピッ

チ差を設けたボルト・ナット締結体も早く提案された。最近になって、適切なピッチ差を与えることで、緩み防止効果を実証された。また、ある範囲のピッチ差では疲労寿命も向上することが示された。そこでは螺旋ねじを軸対称としてモデル化し、有限要素法 (FEM) で解析することで、疲労強度向上のメカニズムが考察された。よって、適切なピッチ差で耐疲労・耐緩みが低価格で実現できることが注目されるようになった。一方、ボルト破損の主要因は、ナットの緩みであり、その緩み止め効果に密接に関係するプリベリングトルク（ねじ込み時の摩擦トルク）が JIS にも規定されている。このようなねじ込みの解析には、螺旋ねじを直接解析する必要がある。そこで、本研究では、ねじ込み過程におけるプリベリングトルクの詳細な挙動を実験的に把握するとともに、ねじ込み過程を 3 次元 FEM によってシミュレーションして、プリベリングトルクを考察している。さらに、「ねじ込み過程」に続いてナットが被締結物に接触した後の「締め付け過程」、ならびに、その後ナットを緩ませる「緩ませ過程」も取り扱っている。そして、これら「締め付け/緩ませ過程」における、締め付けトルクと締結力の発生、ならびにその変化を 3 次元 FEM 解析により求め、実験で得られた結果と比較してピッチ差による影響を明らかにしている。本論文は、以下の 5 章から成る。

第 1 章では、ボルト・ナット締結体の現状と問題点について述べている。また今まで行われてきたボルト・ナット締結体の研究と本論文の内容を比較し、紹介している。

第 2 章ではナットと締結物が接触する前にナットに生じる、ねじ込み抵抗トルクすなわち、プリベリングトルクについて考察している。具体的には、「ねじ込み過程」と「ねじ戻し過程」について実験と解析の両面からプリベリングトルクを求めて、緩み止め性能について考察している。

第 3 章では、正確なピッチ差の求め方について述べている。加工誤差が生じることは不可避であるけれども、このピッチ差付きナットでは、わずかな誤差が緩み止め性能に影響を及ぼす。そこで、ねじ込みにおけるプリベリングトルク発生位置を測定することによって、誤差を含む加工後のピッチ差を正確に評価できることを示している。また、その妥当性をプリベリングトルクの大きさからも検証している。

第 4 章では、ピッチ差付きナットについて、「ねじ込み過程」に続いて、ナットと被締結物が接触した後の「締め付け過程」を取り扱っている。さらに、締め付けに続き、実際のナットの「緩み過程」を模擬して、ナットに逆回転を与える「緩ませ過程」も取り扱っている。そして、これらの「締め付け/緩ませ過程」における、締結力と締め付けトルクの変化を、実験と 3 次元 FEM シミュレーションにより求め、ピッチ差による影響を明らかにしている。具体的には、ピッチ差が有る場合には、ナット緩ませに要するトルクが通常ナットより大きくなり、それが緩み抵抗トルクとみなし得ることを指摘している。さらに、ピッチ差を大きくすると、プリベリングトルクだけでなく、緩み抵抗トルクも増加することを明らかにしている。

第 5 章は総括であり、本研究で得られた主要な結論を要約している。以上、本論文で

は、ねじ込み過程のプリベリングトルクを実験と解析で考察するとともに、締め付け/緩ませ過程における、締結力とトルクを議論している。これらより、ねじ込み、締め付け、緩ませの各過程における、通常ナットとの違いを考察し、ピッチ差付きナットの特徴をより明確にして、緩み止め性能における優位性を明らかにしている。この新たな知見は、工業上ならびに機械工学の分野に寄与するところ大であり、博士（工学）の学位論文に値するものとして認められる。

なお、本論文に関し、調査委員並びに公聴会出席者からは、他の特殊ナットとの比較、ねじ面や座面の摩擦係数、緩み抵抗トルク、ねじ戻し後のピッチ差等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、論文調査会における論文の調査結果およ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議した結果、本論文が博士（工学）に十分に値するものであると判断した。