



Finit Element Analysis of Mechanical and Thermal Behaviors in the Tightening Process of Bolted Joint with Bolt Heater

Xu, Quantuo

(Degree)

博士 (工学)

(Date of Degree)

2000-03-31

(Resource Type)

doctoral thesis

(Report Number)

神戸商船大学甲0007

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/DS100007>

※ 当コンテンツは神戸大学の学術成果です。無断複製・不正使用等を禁じます。著作権法で認められている範囲内で、適切にご利用ください。



専攻名	海洋機械エネルギー工学
氏名	許 全 托
学位名称	博士（工学）
指導教官名	福岡 俊 道 教授
論文題目	Finite Element Analysis of Mechanical and Thermal Behaviors in the Tightening Process of Bolted Joint with Bolt Heater (熱膨脹法によるボルト締結体の締め付け過程における熱挙動と力学特性の有限要素解析)
論文要旨 ボルトヒータを用いた熱膨脹法は、大きいサイズを有するボルトで大型構造物や重要な機器を締め付ける場合に広く用いられている。すなわち、高い軸力が必要とされるために、トルク法や張力法による締め付けが困難な箇所に使用されることが多い。ボルトヒータは安価な締め付け工具にも関わらず容易に大きな軸力が得られるが、その軸力を高い精度で管理することは困難で、実際の締め付け作業は現場の作業者の経験に依存しているのが現状である。したがって、種々の利点を有する熱膨脹法を、広い範囲でのボルトの締め付けに適用するために、その締め付け過程の力学的特性と熱挙動の解明することが工学的な観点から強く望まれる。 本研究では、非定常温度場における弾性接触問題として、熱膨脹法による締め付け過程を有限要素法を用いて解析する手法を提案する。そのために、接触温度場を解析するための一次元接触熱伝導要素を開発した。本研究の第一段階では、熱膨脹法の締め付け過程における基本特性を数値解析と実験により評価する。ここで、最終的に得られる締め付け軸力のみに着目し、締め付け指針の最も重要な因子である加熱時間の長さを変化させた場合に、ボルトの呼び径および被締結体のグリップ長さによる影響を明らかにした。また、ナットの着座トルクの大きさのボルト軸力に対する影響も実験により解明した。 ボルトヒータにより発生する温度場を高い精度で解析するためには、ねじ面やナット座面などの接触面における熱抵抗を定量的に評価しなければならない。しかしながら、大気中環境下において一般的な工業材料に対して適用可能な予測理論も実験式も今までに報告されていないようである。本研究では、サーモグラフィを中心とした熱画像解析装置を用いて接触熱抵抗を精度よく測定する新しい実験手法を開発した。接触熱抵抗の逆数である接触熱伝達率に対して、同種材料で構成される接触面における接触面圧及び表面あらさの影響を広い範囲にわたって定量的に測定した。その結果、大気中環境下における一般工業材料の接触熱伝達率の評価式を確立した。 本研究で提案した接触熱伝達率の評価式及び微小すきまが存在する界面における見かけの接触熱伝達率の計算式を、先に述べた締め付け過程の解析手法に導入することにより、ボルトヒータによる締め付け過程をより高い精度で解析できると考えられる。さらに、数値計算はCrank-Nicolson法に基づいて各時	

間ステップにおいて実施し、温度場と応力場の相互作用も考慮されている。その結果、熱膨脹法によるボルト軸力の発生するメカニズム及びボルト締結体の温度場の変化特性を明らかにした。ここで提案した解析手法の妥当性については、締め付け実験における高温ひずみゲージと動ひずみ計によるボルト軸力の測定、並びに放射式温度計と熱電対による温度の計測により確認された。

実際の現場で長いボルトを締め付ける場合に、ヒータの加熱部の長さに対応してボルトの一部のみが中空となっているいわゆる部分加熱による締め付けの方法が広く使用されている。熱膨脹法の締め付け指針を確立するために、このような部分加熱の締め付け方法についても解析と実験の両面から評価する。最終的に得られる締め付け軸力と加熱過程におけるボルトの温度及びボルトの伸びの関係は実験と解析より示されている。最後に、熱膨脹法における実際の締め付け作業に関して、ボルト先端側の非はめあいねじ部の表面温度およびボルトの伸びを測定することにより、軸力を高い精度で管理できるという具体的な締め付け指針を提案した。

以上の結果により、熱膨脹法は、従来のトルク法や張力法で締め付けていた数十mmのボルトも含めてより広い範囲での適用が可能であるといえる。また、本研究で提案した解析手法は、一般的な接触構造物が非定常熱荷重を受けた場合の温度場と応力場の解析にも有効であると考えられる。

審 査 概 要

本論文は、ボルトヒータを用いたボルト締付け過程の力学的特性を解明し、その適用範囲を拡大することにより、締結工学の発展に寄与することを目的としている。

一般にボルトヒータは、トルク法や油圧テンショナを用いた張力法では締め付けることができないような大きな呼び径のボルトの締め付けに適用されている。したがって、基本的に付加価値の高いボルトが対象であり、締付け作業が熟練者の技量に任されている場合が多い。その結果、ボルトヒータの締付けに関する力学的特性については、初等材料力学に基づいた式が示されているのみで、実用的に有効な締付け指針は確立していない。一方、ボルトヒータは寸法が小さく、狭隘な箇所のボルト締付けに極めて有効である。また、比較的大きなボルトの締付けに使用される油圧テンショナと比べると安価であり、ボルトヒータの締付け指針の確立は工学的な観点から極めて有効であるといえる。

本研究では、まず第2章でボルトヒータの締付け過程を解析する上で必要な有限要素法の定式化について述べている。ボルトヒータで加熱した場合に発生するボルト締結体の温度分布は、熱負荷を受ける接触構造物の温度場として解析される。ここでは、接触面の熱伝導特性を考慮するために一次元熱伝導要素を提案している。また、その結果発生するボルト軸力は、非定常温度場における接触問題として解析される。これらの問題はいずれも軸対称問題として扱われている。

第3章では、以上の手法を適用して、種々の条件でボルトを加熱した場合に発生するボルト軸力を求めて実験結果と比較している。解析に際して、接触面における「接触熱伝達率」が無限大、あるいは断熱という極端な条件を適用しているにもかかわらず、解析と実験は比較的一致している。

第4章では、前章の解析と実験の差が接触面の接触熱抵抗に起因すると考えて、その逆数である「接触熱伝達率」をサーモグラフィーを用いて測定する手法を提案している。その結果から、一般に広く用いられる炭素鋼、ステンレス鋼、アルミニウム合金、アルミニウムなどの工業材料について、広い範囲の接触面圧および表面あさが種々変化した場合に対して有効な「接触熱伝達率」の評価式を提案している。

第5章では、前章で求めた接触熱伝達率の評価式に加えて、ボルトヒータの加熱過程に大きく影響すると考えられる小さなギャップを通して伝わる熱の評価式を提案している。実際には、ボルトと被締結体の間、ねじ面の遊び側フラック、加熱過程におけるボルト頭部座面が対象となる。その場合ギャップを通して伝わる熱は、空気の熱伝導とふく射の組み合わせによって起こるとしている。以上の式を、有限要素法に組み込むことにより解析を実施しているが、得られた結果は実験値とかなり近い値となり、解析精度が大きく改善されている。

第6章では、実際の締付け作業への応用を視野に入れて、長いボルトを締め付ける「部分加熱」の場合を解析し、良好な結果を得ている。また前章までに得られた結果に基づいて、熟練作業でなくてもボルト軸力のある程度の精度で管理できる締付け手順を提案している。

第7章では、本研究で得られた結果をまとめている。

最終試験においては、本論文の中核をなしている数値解析と実験について、当該学生が主体性を持って

研究を進めたこと、さらに本論文に関連する工学分野について十分な見解と知識を有していることを確認している。

なお、本論文の内容は以下に示した関連学会に報告されている。

1) 題目：「熱膨張法によるボルト締め付け過程について」

著者：福岡、許

日本機械学会論文集（A編）、第63巻、第607号、561～566ページ（1997年3月）

2) 題目：「大気中環境下における接触熱抵抗の評価」

著者：福岡、許

日本機械学会論文集（A編）、第65巻、第630号、248～253ページ（1999年2月）

3) 「熱膨張法によるボルト締め付け過程の解析（接触面の熱抵抗を考慮した場合）」

著者：福岡、許

日本機械学会論文集（A編）、掲載確定

本論文を構成している第2章、第3章の内容は論文1)に、第4章については論文2)に、第5、6章の内容は論文3)にそれぞれ掲載されている。

なお、1)、2)の内容はアメリカ機械学会のPVP（圧力容器および配管）部門の国際会議において自らが講演し、高い評価を得ている。

1) Title : “ANALYSIS OF THE TIGHTENING PROCESS OF BOLTED JOINT WITH A BOLT HEATER”

Authors : T. Fukuoka and Q. Xu

ASME PVP Conference, 1998, PVP-Vol. 367, pp. 53-59.

2) Title : EVALUATIONS OF THERMAL CONTACT RESISTANCE IN AN ATMOSPHERIC ENVIRONMENT

Authors : T. Fukuoka and Q. Xu

ASME PVP Conference, 1999, PVP-Vol. 382, pp. 145-151.

以上の点から、本研究は博士論文に値すると考えられる。