

## 審査の結果の要旨

氏名 横山 喬

本論文では、軸直角方向外力を受けるボルト締結体の力学的挙動のモデル化を行ったものである。ねじ締結は、標準化され幅広く使用されている一方で、その破損による不具合は現在でも頻繁に発生している。そのうち、回転ゆるみは重大な破損モードの一つであり、軸直角方向外力は回転ゆるみを発生させる支配的な荷重モードである。軸直角方向外力によるゆるみのメカニズムは三次元 **FEM** 解析により接触面におけるすべり挙動に基づいて説明されたが、設計においてはより簡易な計算で締結体挙動を評価することが求められる。そこで、本研究ではボルト締結体の接触面におけるすべり挙動に着目して接触力とすべり変位のモデル化を行い、荷重変位関係や回転ゆるみといった締結体挙動のモデル化に結びつけた。

第 1 章では、序論として、軸直角方向外力を扱う重要性を示し、これまでに明らかにされたメカニズムをモデル化する意義を述べた。

第 2 章では、本研究で対象とする締結体を説明し、その **FEM** 結果を用いて本研究でモデル化を行う荷重変位関係と回転ゆるみのメカニズムを説明した。

第 3 章では、軸直角方向外力を受けるボルト締結体について、ボルト座面が完全すべりに達する以前の荷重変位関係を導出するモデルを構築した。まず、荷重変位関係における並進変位が、ボルトの曲げ変位と接触面におけるすべり変位に関する 5 つの要因から成ることを示した。5 つの要因を計算するために、本研究ではねじ面とボルト座面に発生する反作用モーメントの定式化とすべり変位のモデル化を行った。

反作用モーメントの定式化について、**FEM** で得た反作用モーメントの変化の様子からそのメカニズムを示した。局所ねじ面すべり時にはボルト軸の傾きにより外力の作用方向と反対側でねじ面反力が増加し、完全ねじ面すべり時にはボルト軸の並進により外力の作用方向のねじ面反力が増加することが、反作用モーメントの変化の原因であることを明らかにし、ねじ面と座面への反作用モーメントの配分は、はめ合いねじ部とボルト頭の傾きに対するばね定数に比例するものと考えて定式化した。

次に、接触面のすべり変位のモデル化を行った。接触面を周方向に分割し、ねじ山のらせん形状を考慮して接触力分布を定式化した。外力作用に対して接触力分布を初期設定した後すべりの判定を行い、すべりが発生した領域においては摩擦力とのつり合いを保つよう接触力を修正して接触力分布の収束解を得た。ねじ面と座面の相互作用として、ねじ面に発生するトルクを座面に伝達させ、ボルトのねじれをモデル化した。すべり変位に関しては、ねじ面、座面とも局所すべり時には接触部の弾性変形を求める従来理論を応用して定式化を行った。ねじ面の完全すべりによる変位は、外力に比例する並進変位と、ボルト軸のねじり変位より求めた。

以上の計算を、締結体に作用する荷重を段階的に変化させて繰り返し行い、荷重変位関係を求めた。

第4章では、上記の荷重変位関係を導出する力学モデルを拡張し、回転ゆるみ挙動をモデル化した。荷重変位関係のモデル化では完全座面すべりの発生以前の挙動をモデル化したが、ここでは微小座面すべりによるゆるみと完全座面すべりによるゆるみの両方を扱うため、完全座面すべり時のすべり変位をモデル化した。完全座面すべり時には、微小座面すべり時に蓄えられたボルトのねじれの解放により、ねじ面、座面ともに回転が発生することを考慮してすべり変位を定式化した。得られたボルト座面の回転角をゆるみ回転角とし、これと締結体の軸方向変形に対するばね定数とから、締結力の減少量を導出した。

第5章では、構築した力学モデルを用いて計算を行い、荷重変位関係、回転ゆるみの進行を再現できることを確認した。回転ゆるみの進行については、接触面における力学的挙動の本質は表され、締結体挙動に反映されているものといえる。実用性に対する検証として、山本らによる実験と同様の条件で計算を行い、荷重変位関係とゆるみ回転角の推移についてよく一致する結果を得た。これらの検証結果から、実機的设计における締結体挙動の予測・評価において、提案する力学モデルが適用されることが期待される。

第6章では、結論と研究の展望を述べた。本力学モデルは軸直角方向外力のほかに回転ゆるみを生じやすい荷重モードである軸回り外力の場合にも展開することは可能であり、さらに軸方向外力の影響を考慮すれば一般的な荷重に対する締結体挙動を得ることができるようになる。

構築されたモデルは、締結体における本質的な力学的挙動を抽出し、従来理論と新たな接触面挙動の定式化を組み合わせることでモデル化することにより、設計計算に使用可能な程度の力学計算で締結体挙動を再現することが可能である。

以上の内容に基づき、本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。