

構造体の固有振動モードを用いた ボルト締結力の推定技術に関する研究

吉田勇太* 高野昌宏* 宮川広康* 新谷正義*

機械装置などの構造体に使用されている締結ボルトの緩みは、装置の性能低下や破壊の原因となるため、締結力の管理が重要である。本報告では、構造体のボルト緩み箇所の特定と締結力を推定することを目的に、緩み箇所の特定に有効な固有振動モードを選定し、そのときのモーダルパラメータ(固有振動数)の変化から締結力を推定する手法を提案した。なお、締結力はFEM解析から導出した推定式を用いて求めた。ミニチュア旋盤を対象に実験した結果、締結部が節となる固有振動モードが緩み箇所特定に有効であることがわかった。さらに、各締結部に対して求めた締結力の推定式を用いて、締結力の低下が検知できることを実験で明らかにした。

キーワード: 固有振動モード, 締結力, FEM解析

A Study on Estimation of Bolt Clamping Force Using the Natural Vibration Modes of Structures

Yuta YOSHIDA, Masahiro TAKANO, Hiroyasu MIYAKAWA and Masayoshi SHINYA

The slackening of fastening bolts used in structures such as machinery can result in performance degradation and fractures. Therefore, monitoring of the clamping force is critical. The purpose of this study was to identify the locations of bolt slackening in structures, and to estimate the fastening force. We proposed a method for estimating clamping force from changes in modal parameters (eigenfrequency) by selecting natural vibration modes effective in identifying the locations of slackening. The clamping force was obtained using an estimation formula derived from FEM analysis. The structure used in this study was a miniature lathe. It was found that natural vibration modes with nodes at the clamping positions were effective for identifying the locations of slackening. In addition, it was clarified via experiment that a decrease in clamping force can be detected using the clamping force estimation formula obtained for each clamping position.

Keywords: natural vibration mode, clamping force, FEM analysis

1. 緒 言

機械装置などの構造体には締結ボルトが多く使用されており、その緩みは機械装置の性能低下や破壊の原因になるため、締結力の管理が重要である。現在、ボルト緩みの点検は主にハンマを用いた打音検査や超音波による軸力測定等によって行われているが、作業者が個々の締結ボルトに対して点検を行う必要があるため時間やコストがかかるという問題がある。さらに、打音検査はボルトの緩み度合いまではわからない²⁾、超音波検査は軸力の検出はできるが、ボルト軸方向の伸びを測る手法のためボルト端面を平滑に加工する必要があり使用範囲が限定される³⁾という問題がある。

このため、ボルト緩み検知の無人化や自動化、緩み度合いの検出が切望されている⁴⁾。

これらのボルト緩みの課題に対して、振動データを用いた検知技術が検討されている。例えば、自動でボルトをハンマリングして力と加速度の関係から締結力を求める手法²⁾、ボルト締結部に挟み込んだ薄板の固有振動数の変化から検出する方法^{1),4)}、ボルト頭部やナットから突き出した先端部分の固有振動数の変化を利用する方法^{5),6)}がある。さらに、取り付け状態のボルトを軸方向に電磁加振したときの固有振動数の変化を利用する方法³⁾もある。これらの方法はボルト穴の位置や形状により取り付けできない、また使用するボルト径や長さが限定されるという短所がある。さらに、ボルト1本ずつの緩みを検知する手法であるため、多

*機械金属部

数のボルトを使用した締結部では煩雑になり適していない。

そこで、本研究では、構造体の固有振動モードに注目し、ボルト緩み箇所の特定に有効な固有振動モードを選定し、そのモーダルパラメータの変化から緩み箇所の特定と締結力を求める手法を提案した。この手法は部品間の緩みを締結剛性の変化から評価するものであり、ボルトの形状や数に影響されないことを特徴とする。この手法を用いて実機のボルト締結部の緩み推定の有効性を検証したので、その結果を以下に報告する。

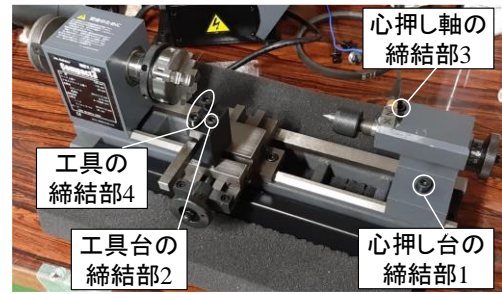
2. 締結力の推定手法

2.1 締結力推定のプロセス

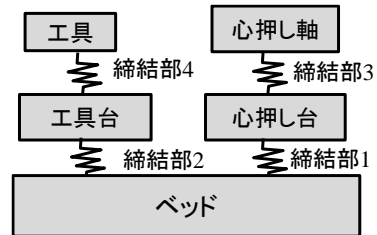
本研究で提案するボルト締結力推定のプロセスを図1に示す。対象とする構造体を3Dモデル化し、有限要素法(以下、FEM)による固有値解析を行う。そして、モーダルパラメータと締結力との関係を明らかにし、パラメータの変化から締結力を推定する式を求める。その後、対象とする構造体を実際に加振し、取り付けた加速度センサから振動データを取得する。次に、得られた振動データを用いて実稼働モーダル解析を行い、モーダルパラメータを算出する。さらに、モーダルパラメータを先にFEM解析によって求めた締結力の推定式に代入して、ボルト締結力を算出する流れである。

2.2 対象とした構造体とボルト締結箇所

本研究では、複数の部品がボルト締結されたミニチュア旋盤(Compact3・(株)東洋アソシエイツ)を対象とした。図2(a)にその外観と検証対象とした4箇所のボルト締結部を示す。締結部1～3はボルト1本、締結部4はボルト2本で締結されている。これらの締結部について、締結ボルトをばね、部品を質量でモデル化して表した



(a) 4箇所のボルト締結部



(b) ばね-質量系モデル

図2 ミニチュア旋盤

図を図2(b)に示す。ベッドに心押し台と工具台がそれぞれ締結部1と2でつながり、心押し台に心押し軸が締結部3でつながり、工具台に工具が締結部4でつながった構造である。本研究では、4箇所の締結部の内、1箇所のみ緩んだ状態を想定した。締結部4は、2本のボルトを同時に緩める条件とした。なお、締結部のボルトは全てM6の六角穴付ボルト(強度区分8.8、規定の締結力11.1 N・m)である。締結力が1.1 N・mでは、軸力は1000 N、締結力が11.1 N・mでは、軸力は10000 N発生する関係がある。

2.3 締結力の推定式導出

2.3.1 ボルト締結箇所のモデル化

解析モデルは、図3に示すように4箇所の締結部以外は簡略化して表した。ボルトの締結力を変化させる条件で静解析を行うと、図4のように締結力に応じて部品間に接触面圧の分布が生じる。このとき、面圧にあるしきい値を設け、しきい値以上の部分を接触領域とすることで、締結状態をモデル化した。先に実施した簡易的な締結モデル実験において、面圧しきい値を20 MPa以上に設定することで、緩みが生じたときの固有振動数の変化が実験とほぼ一致することを確認している⁷⁾。本研究においても同様のしきい値で締結状態をモデル化した。FEM解析は汎用有限要素解析ソフトウェア(ANSYS ver.19.2)を使用して行った。解析に使用

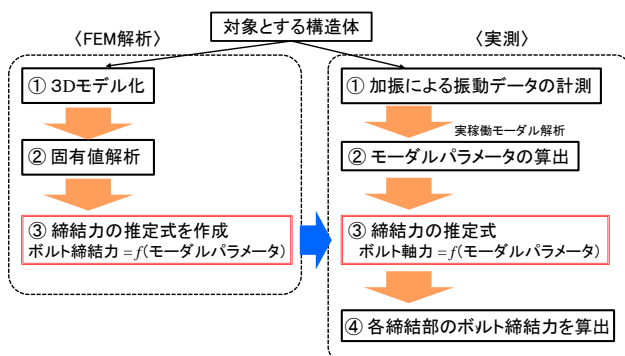


図1 ボルト締結力推定のプロセス

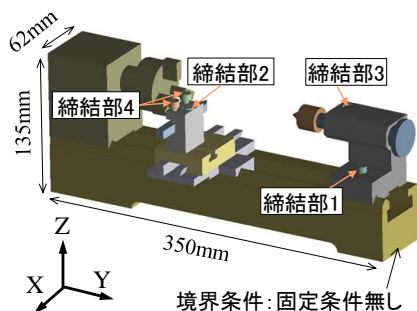


図3 FEM解析モデル

表1 物性値

	ミニ旋盤の構造部品	締結ボルト
ヤング率	110 GPa	8.24 GPa
ポワソン比	0.28	0.30
密度	7200 kg/m ³	7850 kg/m ³

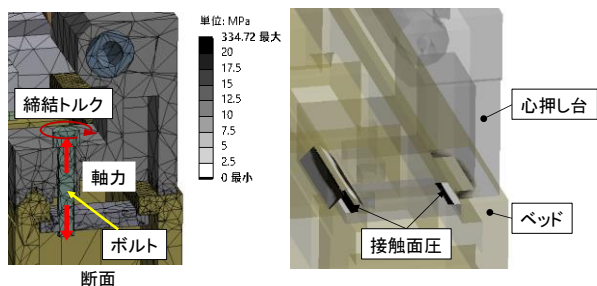


図4 締結部1の接触条件

した物性値は表1のとおりである。

2. 3. 2 固有振動モードの選定と締結力の推定式導出

ボルト締結力を1.1~11.1 N・m(軸力1000~10000 N)

の間で変化させ、固有値解析を行った。固有振動モードを選定するため、対象とする締結部が緩んだときに固有振動数が変化し、対象としない締結部が緩んだときは固有振動数が変化しない振動モードについて、低いモード次数から順に50次まで調べた。なお、モード次数が6次以下は剛体運動のモードであり、7次以上は弾性変形のモードである。

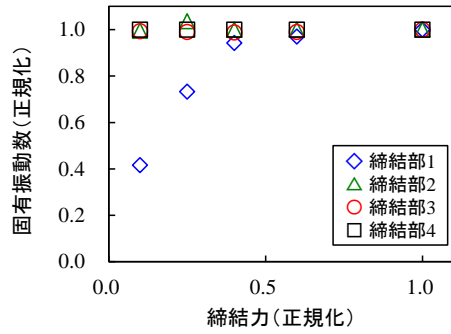
表2に各締結部の緩み検知のために選定した固有振動モードと固有振動数、モード次数を示す。表示した振動モードは、規定の締結力で締結した状態のモードである。選定した振動モードは、締結部1については7次、締結部2については14次、締結部3については50次、締結部4については40次になった。図5に締結部1~4の締結力と選定した固有振動モードのモーダルパラメータである固有振動数の関係を示す。締結力は初期締結力11.1 N・m、固有振動数は締結時の固有振動数で正規化した値である。

図5(a)に示す7次モードでは、締結部1の締結力が低下すると固有振動数が変化するが、締結部2, 3, 4の締結力が低下しても固有振動数が変化しない。よって、7次モードの固有振動数を見ることで締結部1のみが緩んだ状態を検知可能である。同様に、図5(b)に示す14次モードは、締結部2の締結力が低下するときのみ固有振動数が変化しており、締結部2のみが緩んだ状態を検知可能である。

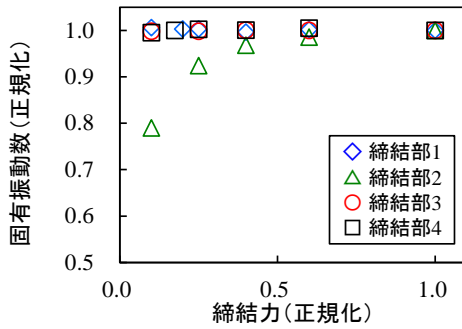
一方、締結部3, 4については、対象とする締結部が緩んだときのみ固有振動数が変化するモードは無かった。図5(c)に示す50次モードでは、締結部3の締結力が低下すると固有振動数が変化するが、締結部1の締結力が低下するときも固有振動数が変化する。また、図5(d)に示す40次モードでは、締結部4の締結力が低下

表2 選定した固有振動モード

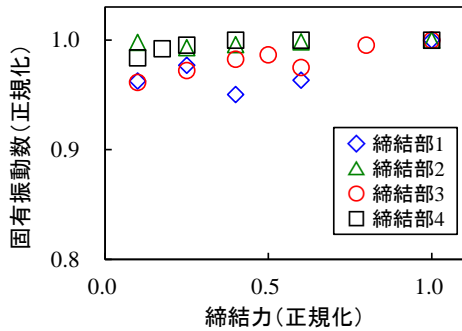
	締結部1 (心押し台)	締結部2 (工具台)	締結部3 (心押し軸)	締結部4 (工具)
選定した固有振動モード				
固有振動数 (モード次数)	502Hz (7次)	1823Hz (14次)	7840Hz (50次)	6418Hz (40次)



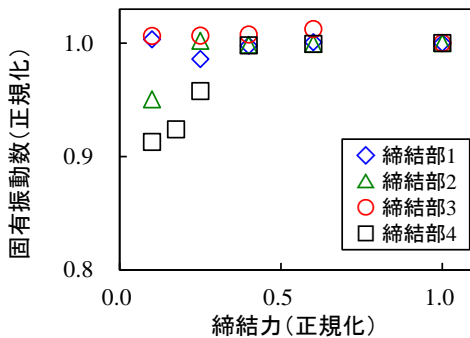
(a) 7次モード



(b) 14次モード



(c) 50次モード



(d) 40次モード

図5 各締結部が緩んだときの固有振動数の変化

すると固有振動数が変化するが、締結部2の締結力が低下するときにも固有振動数が変化する。これらは、図2(b)からわかるように締結部3が締結部1の上に結合、また締結部4が締結部2の上に結合しているためと考えられる。選定した振動モードは、いずれも締結部が節になり曲がるモードであり、緩み箇所の特定に有効であるとわかった。

ここでボルト緩み箇所の推定の順序を、締結部1、2を先に推定し、その後に締結部3、4を推定する順序にすることで、4箇所の締結部のいずれか1箇所が緩んだ状態が検知可能である。

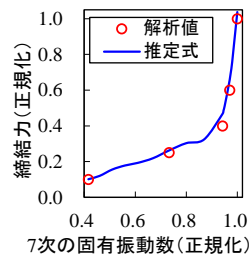
締結力の推定式は、図6に示すように、対象とした締結部が緩んだときの締結力と固有振動数の関係を多項式近似することで導出した。近似式は式(1)⁸⁾(2次多項式の場合)から求めた。

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^m \beta_{i+m} x_i + \sum_{i=1}^m \beta_{i+2m} x_i^2 + \sum_{i=1, i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (1)$$

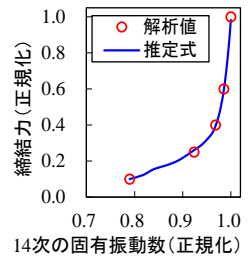
ここで、 y 、 x 、 β は応答(締結力)、変数(固有振動数)、係数である。締結部4については、締結力が0.4~1.0の範囲では、固有振動数がほぼ変化しないため、近似が難しく推定式の精度が低くなった。

3. 実験による締結力推定の検証

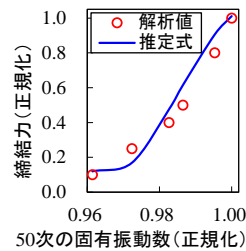
実機において締結力の推定手法の有効性を検証した。構造体の加振には、圧電素子(Z2T30D-SYX(C-82)・株式会社セラミックス)を使用した。表3に圧電素子の取付



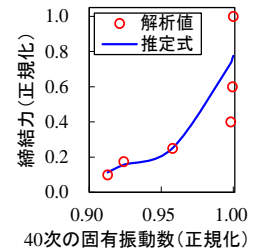
(a) 締結部1



(b) 締結部2



(c) 締結部3



(d) 締結部4

図6 締結力の推定式

表3 加振位置と測定位置

締結箇所	加振			測定	
	加振位置	方向	周波数範囲 Hz	測定位置	方向
締結部1	ベッド	X	100-600	心押し台	X
締結部2	ベッド	Y	1000-3000	工具台	Y
締結部3	心押し台	Z	3500-10500	心押し軸	Z
締結部4	ベッド	Z	3000-8000	工具	Z

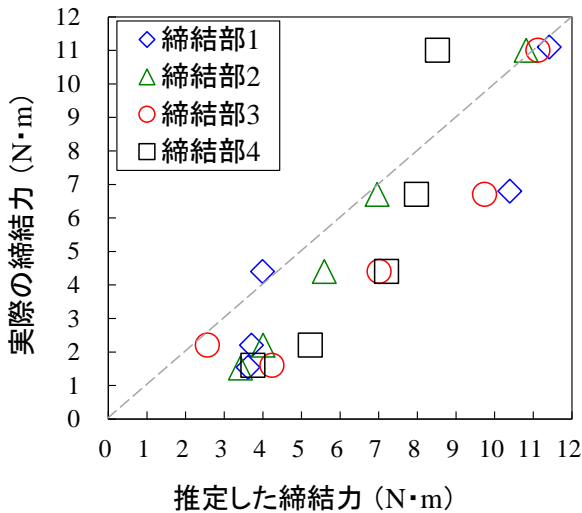


図7 実測と推定した締結力の比較

位置と加振の方向と周波数範囲，また，振動データの計測に使用した加速度センサ(352C33・PCB Piezotronics)の取付位置と測定方向を示す。対象とする締結部に結合する片側の部品を加振し，反対側の部品に取り付けた加速度センサから振動データを取得した。加振は正弦波を掃引加振する条件で行った。計測は計装化振動試験機(SCM2E05V・シーメンス)を使用した。実稼働モダ解析より固有振動数を算出し，前節で作成した締結力の推定式から締結力を求めた。図7に締結部1～4がそれぞれ緩んだときの推定した締結力と実際の締結力の関係を示す。推定したボルト締結力と実際の締結力の相対誤差の平均は37%であり，締結部1～4のそれぞれについて，締結力が初期締結力から低下する状態が推定できていることが確認できる。これにより完全にボルトが緩む異常状態になる前に締結力が低下する状態を予測することが可能であることが示された。

4. 結 言

ミニチュア旋盤の4箇所の締結部について，ボルト緩み箇所の特定制と締結力を推定することを目的に，FEM解析から緩み箇所の特定制に有効な固有振動モードを選定して，締結力を推定する手法を提案し，有効性を評価した。以下のような結果を得た。

- (1) 締結部が節になり振動する固有振動モードを選定し，推定の順序を考慮することで，緩みが生じた締結部が特定可能である。
- (2) 選定した固有振動モードの固有振動数と締結力の関係を近似式で表すことで，締結力の低下が推定可能である。

参考文献

- 1) 中原健志，大宅由佑，大熊政明. ボルト緩み検知用薄板形センサの初期緩み感度向上に関する研究. 日本機械学会論文集(C編). 2006, no. 72, vol.719, p. 2232-2239.
- 2) 田中成典，三上市蔵，樋渡達也，窪田諭. ニューラルネットワークを適用した鋼橋の高力ボルトの軸力測定方法に関する研究. 日本ファジィ学会誌. 2000, no. 12, vol. 4, p. 539-551.
- 3) 福岡俊道，野村昌孝，菅野伸国. 電磁加振法によるボルト軸力測定の適用性評価. 日本マリンエンジニアリング学会誌. 2008, no. 43, vol. 4, p. 591-597.
- 4) 田中亨，奥川雅之. スーパーバイザを適用したスマートワッシャによるボルト締結体の緩み検知. 日本機械学会論文集(C編). 2008, no. 74, vol. 747, p. 2669-2676.
- 5) 新倉孝典，細矢直基，橋村真治. “実験モード解析によるボルト締結体の軸力検知”. Dynamics and Design Conference 2016論文集. 宇部, 2016-8-23/26, 日本機械学会. 2016, p. 353.
- 6) 細川恭彦，細矢直基，梶原逸朗. “打撃試験を用いた高周波数帯域の特性変動検知に基づくヘルスマonitoring”. Dynamics and Design Conference 2010論文集. 京田辺市, 2010-9-14/18, 日本機械学会. 2010, p. 610.
- 7) 吉田勇太，高野昌宏，宮川広康，新谷正義. モダパラメータを用いたボルト締結体の軸力推定技術に関する研究. 2022年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集. 東京工業大学, 2022-3-15/17, 精密工学会, 2022, p. 403.
- 8) 藤島 寧，若尾 真治，松岡 孝一，近藤 稔. “応答曲面近似法による機器最適化計算の高速化”. 電気学会論文誌. 2003, no. 123, vol. 4, p. 371-378.