

振動データを用いた締結ボルトの緩み箇所診断技術

機械金属部 ○吉田勇太 高野昌宏 宮川広康 新谷正義

1. 目的

機械装置や構造体にはボルト締結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、安全な運転には、締結力の管理が重要である。現在、ボルト緩み点検は主に熟練者による打音検査によって行われている。一方、最近では、IoT 技術が普及し、センサからのデータを活用した異常検知に関する取り組みが注目されている。そこで、本研究では、複数のボルト締結部を有する機械構造体に対して、取り付けた加速度センサからの振動データを用いて緩みが生じた箇所の特定および締結力を求めることを試みた。

2. 内容

2.1 ボルト軸力の推定手法

対象にした機械構造体は、図 1 (1) に示すミニチュア旋盤加工機 (Compact3・(株)東洋アソシエイツ) であり、これのボルト締結部を「ばね-質量系」で表したモデル図を図 1 (2) に示す。ベッドに心押し台 (締結部 1) と工具台 (締結部 2) がボルト締結され、心押し台に心押し軸 (締結部 3) が、また工具台に工具 (締結部 4) がボルト締結されており、これら 4 箇所について、締結力の推定を行った。締結に使用されているのは全て M6 の六角穴付ボルトである。なお、本研究では、4 箇所の締結部に対して、1 箇所のみ緩んだ状態を想定した。ボルト締結力の推定の流れを図 2 に示す。まず、実機において、締結部近くに取り付けた加速度センサから振動データを計測し、実稼働モデル解析を行い、振動パラメータを算出する。次に、振動パラメータと締結力の関係から事前に導出した推定式にその結果を代入してボルト締結力を算出する。

2.2 ボルト軸力の推定式の作成

締結力推定に必要な式導出のため、FEM 解析により推定に有効な固有振動モードを選定し、固有振動モードを表す振動パラメータと締結力の関係を求めた。図 3 に FEM 解析で使用したモデルを示す。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。部品と部品の間の締結剛性は、締結力が変わると部品間の接触面圧が変化するため、これに応じて接触面積を変えることで設定した (図 4 参照)。ボルト締結力を 1.1~11.1N・

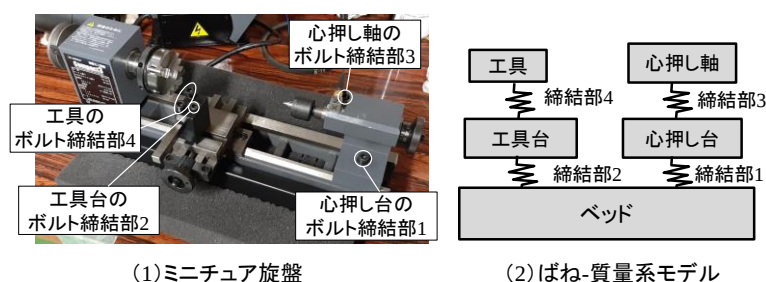


図 1 対象とした機械構造体

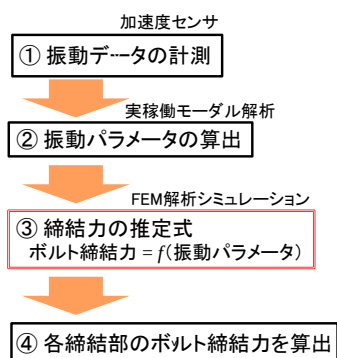


図 2 締結力推定の流れ

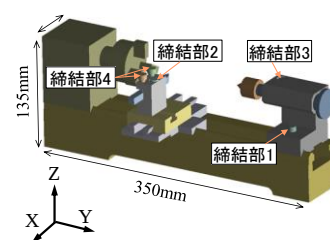


図 3 FEM 解析モデル

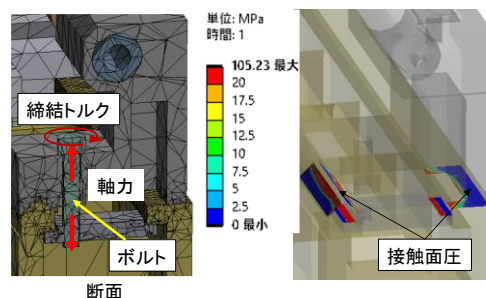
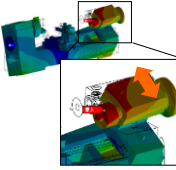
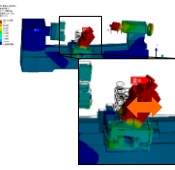
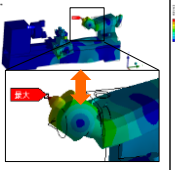
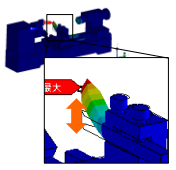
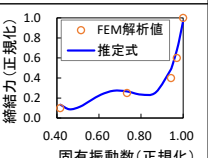
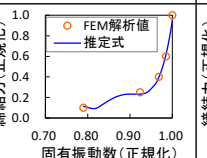
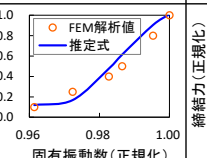
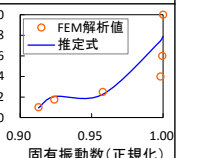


図 4 締結部 1 の接触条件

m（軸力 1000～10000N）の間で変化させ、固定条件なしでモーダル解析を行った。表1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。その結果、7次以上の締結部が節になり、曲がる固有振

表 1 固有振動モードとボルト軸力の推定式

	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)
締結力を求める推定式の作成				

動モードに注目することで、緩みが生じた箇所を判定できるとわかった。また同表に締結部1～4の締結力と固有振動数の関係を示す。締結力は初期締結力、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。この締結力と固有振動数の関係を多項式近似することでボルト締結力を推定する式を求めた。

2.3 実験による締結力推定式の検証

ボルト締結力を推定する式を用いて、実機において締結力を求めた。表2に機械構造体の加振に使用した圧電素子の取付位置と加振方向、また、振動データ計測に使用した加速度センサの取付位置と測定方向を示す。また加振については正弦波を掃引加振する条件で行った。図5に締結部1～4がそれぞれ緩んだときの推定締結力と実際の締結力の関係を示す。なお、各締結部の初期締結力は11N・mである。締結部1～4のそれぞれについて、締結トルク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わかる。これにより完全にボルトが緩む異常状態になる前に緩みつつあるボルト締結箇所を予測することが可能であることが示された。なお、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33%であった。

表 2 加振位置と測定位置

締結箇所	加振位置、方向	測定位置、方向
締結部1	ベッド、X方向	心押し台、X方向
締結部2	ベッド、Y方向	工具台、Y方向
締結部3	心押し台、Z方向	心押し軸、Z方向
締結部4	ベッド、Z方向	工具、Z方向

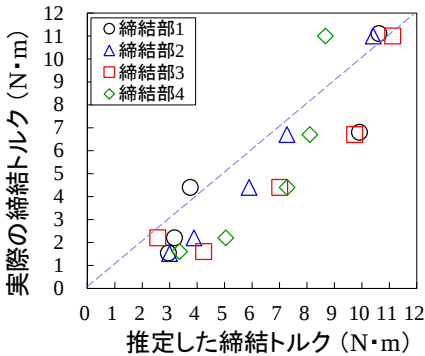


図 5 実測と推定した締結トルクの比較

3. 結 果

FEM 解析によって締結部が節になり振動する固有振動モードを選定し、ボルト締結力と固有振動数の関係式を導出するとともに、そこからボルト締結力を推定する手法を見出した。その結果、ミニチュア旋盤の4箇所の締結部について、緩みが生じた箇所の特定および締結力の低下を推定することができた。