

京都大学大学院 学生員 ○田村 羅山 京都大学大学院 正会員 北根 安雄
 京都大学大学院 正会員 五井 良直 京都大学大学院 正会員 杉浦 邦征

1. はじめに

インフラ構造物の老朽化が社会問題となっている今日、その効率的な維持管理が求められている。既設橋梁の摩擦接合継手部における高力ボルト残存軸力の把握は、その簡便さから近接目視点検とハンマリングによる打音検査によって行われることが多いが、点検者の主観や経験によるところが多く、また定量的でないという実情がある[1]。

細矢らの研究[2]より、ボルト底部を片持ち梁とみなした時にボルト軸力によってその接合剛性が変化し曲げモードの固有振動数が変化することがわかっており、これが高力ボルトにおいても同様であるかを明らかにするため、有限要素解析ソフト Abaqus を用いて高力ボルトの三次元モデルを作成し、固有値解析によって各モードの固有振動数の周波数帯を特定し、軸力によるその変化を調べた。

2. 解析概要

本研究では、日鉄ボルテン製 F10T M22 のカタログ値[2]を参考に、軸部直径 22mm、ボルト頭とナット厚を 14mm、22mm とし、首下長さ 80mm のボルトを Abaqus 上で再現した。寸法は図 1 図 2 の通り。摩擦接合継手で用いることを想定し、板厚は接合板と母板を合わせて 40mm、6mm 厚のワッシャーを両側 1 枚ずつ用いるものとして、円筒でボルトを再現し、ボルトとナットは一つのパートで 8 節点ソリッド要素とし、0.8mm を基本サイズとして要素分割を行った。

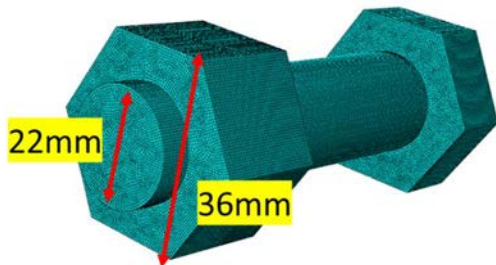


図 1 モデル寸法 断面

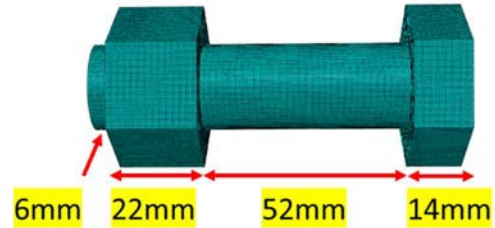


図 2 モデル寸法 側面

また、材料特性は一般的な鋼材の値を参考とし、密度を 7.8g/cm^3 、ヤング率を 200GPa 、ポアソン比を 0.3 とした。境界条件は、ボルト頭部およびナット部の接合板との接触面(図 3)を固定支持とした。この時、ボルト孔は 24.5mm としてこれを考慮して中心軸から 24.5mm の円の外側を固定した。また、軸部中央にボルト荷重オプションを適用(図 4)し、設計ボルト軸力の 1.1 倍の大きさとなる標準ボルト軸力 226kN を軸力 100% として表 1 に示す 5 通りをボルト荷重として適用した。

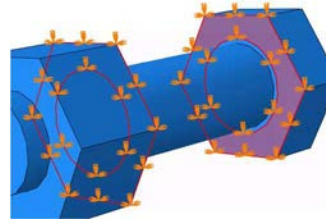


図 3 境界条件位置

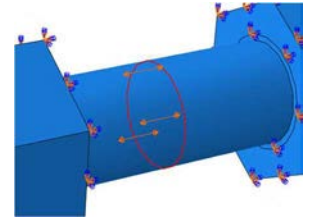


図 4 ボルト荷重位置

表 1 軸力パターン

軸力割合	軸力(kN)
100%	226
75%	169.5
50%	113
25%	56.5
0%	0

梁の曲げ振動については、 f :固有振動数、 P :軸力、 β_n :振動数方程式の解を用いて

$$f = \frac{\beta_n^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho A}} \sqrt{1 + \frac{P}{EI} \left(\frac{l}{n\pi}\right)^2} \quad (1)$$

より軸力によって固有振動数が上昇することがわかる。ボルトにおいてもこの傾向が見られると想定し、

この固有振動数およびその変化量を求めることを目的とする．なお，式の導出には土木振動学[4]を参考とした．

3. 解析結果

解析から得られた各固有モード形状を図 5 示す．本研究では，固有振動数の小さいものから順に 1 次，2 次，，と呼ぶこととする．1,2 次が軸部中央の曲げ，3,4 次がボルト底部の曲げ，5 次が縦振動，6 次がボルト底部のねじり振動のモードであった．また，各モードと軸力パターンに応じた固有振動数を表 2 にまとめた．固有振動数は 1,2 次モードでおよそ 20kHz，3,4 次モードでおよそ 24kHz となり，5 次モードで 28kHz，6 次モードで 33kHz を超える値となることがわかった．

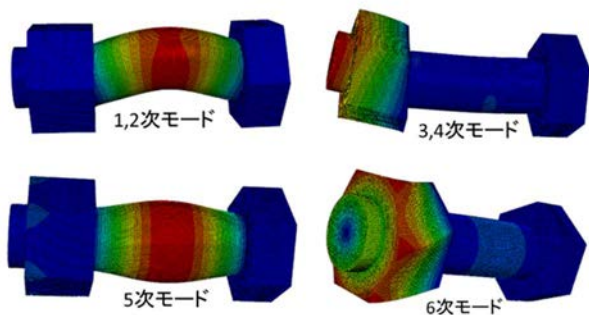


図 5 各モード形状

表 2 各モードと固有振動数

		軸力				
モード		0%	25%	50%	75%	100%
	1	19977	19986	19996	20005	20014
	2	19983	19992	20001	20010	20019
	3	24376	24379	24382	24384	24387
	4	24377	24380	24383	24385	24388
	5	27999	27998	27997	27996	27995
	6	33547	33548	33549	33549	33550

各モードにおける軸力による固有振動数変化は線形的に変化し，図 6 図 7 のようになる．1,2 次モードでは最大 36Hz の変化が見られ，3,4 次モードでも約 10Hz の変化が見られた．また，5,6 次モードでは軸力によって固有振動数が 3,4Hz 変化する結果となった．この 1,2 次の曲げモードの固有振動数変化については，式(1)で示した通りであるが，3,4 次モードの固有振動数変化は細矢らの研究で着目されていた振動モードで高力ボルトにおいても，軸力によって固有振動数が変化することが分かった．これらの振動モードの固有振動数を加振し，測定することができれば，軸力を定量的に推定することが可能になると考える．

1,2次モード

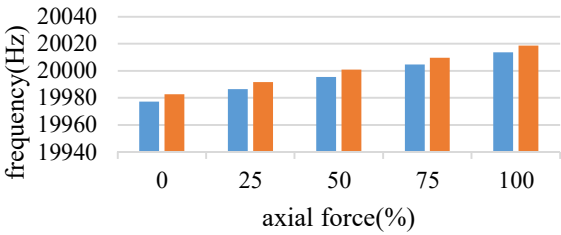


図 6 1,2 次モードの固有振動数変化

3,4次モード

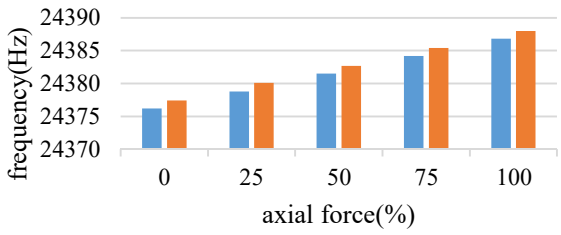


図 7 3,4 次モードの固有振動数変化

4. まとめ

本論文では，F10T M22 ボルトを対象に Abaqus 上でモデルを作成し，その固有振動数と軸力による固有振動数変化について調べた．その結果，固有振動数は 1 次モードで 20kHz，3,4 次で 24kHz となり，6 次では 33kHz となることがわかった．また，固有振動数の軸力による変化は，1,2 次モードで最大 36Hz 程度，3,4 次モードで 10Hz 程度の固有振動数変化が確認できた．これらの周波数帯域の加振と計測が可能であれば，軸力の推定に用いることが可能であると考え．圧電スピーカーによる加振を検討しており，これらの周波数帯の振動を励起できるかを今後実験により確認していく．

参考文献

[1]土木学会鋼構造委員会：高力ボルト摩擦接合継手の設計・施工・維持管理指針（案），2021.9

[2]日鉄ボルテン株式会社：
http://www.bolten.co.jp/images/product/catalog/Pamphlet_1_20220525.pdf，2023.7

[3]細矢直基ら：Axial force measurement of the bolt/nut assemblies based on the bending mode shape frequency of the protruding thread part using ultrasonic modal analysis, 2020.10

[4]小坪清真：土木振動学，森北出版，2006.9