S112043

ISO 16047 に準拠した新しいねじ締付け試験機の開発 (水晶圧電式センサシステムの特性評価)

奥村 将大^{*1}, 萩原 正弥^{*2}

Development of a New Testing Machine for Torque/Clamp Force Testing for Threaded Fasteners in Accordance with ISO 16047 (Characteristics of Piezoelectric Sensor System)

Shota OKUMURA^{*1} and Masaya HAGIWARA^{*1} Nagoya Institute of Technology
Gokiso-cho, Syowa-ku, Nagoya, 466-8555 Japan

It is one of the most important issues for structural safety to control the clamp force of bolted joints. However, the accuracy of the testing apparatus commercially available to evaluate the tightening characteristics for wide variety of fasteners is not sufficient. This study aims to develop a new testing machine for torque/clamp force testing, which will meet the requirement specified in ISO 16047. In this study, the root cause of measuring error of the piezoelectric sensor system is analyzed both experimentally and analytically. As a result, it is found that both the torque acting on the preloading bolts and shear stress distribution on the sensor surface may affect sensitivity of piezoelectric shear force sensors as well as the inherent characteristics of the sensors, and the configuration of the sensor system is proposed to reduce the measuring error.

Key Words : Fixing element, Bolted joint, Torque/clamp force testing, Tightening characteristics, Piezoelectric sensors, Measuring error

1. 結 言

ねじ締結体の締付け力を管理することは構造物の安全を確保する上で最も重要な課題の一つである。しかし、締付け力を推定するための特性値を厳密に求めようとする場合、従来の汎用の試験機ではねじ部と座面でのトルクの分離測定において ISO 16047 (Fasteners—torque/clamp force testing) に規定される精度（測ろうとする値の $\pm 2\%$ 以内）を満たすことが難しい⁽¹⁾。また、ISO16047 での規定はないが、通常の試験機では、実際のねじ締結部に比べて剛性がかかなり低くなり、締付け速度の影響が過小評価されてしまうという問題も指摘されている⁽²⁾。

このような問題を解決するための一つの方法として、自身の剛性が高く高精度で、十分な測定容量を持つことに特長を持つ水晶圧電式センサ素子を組込んだ軸力／トルクセル・システムが提案されたが⁽³⁾⁽⁴⁾、トルクの分離測定において除去できない誤差が発生し、まだ十分な測定精度は得られていないのが現状である。

そこで本報では、その誤差要因を特定し、排除する方法を検討するため、現状の測定系をモデル化し、有限要素法によってその変形やセンサ面上の応力分布に関する解析を行うとともに、座面板やセンサの配置の影響について検討を行っている。

2. トルクセル・システムの特性評価

2・1 実験装置

図 1 に試験機の基本構造を示す。この試験機は上板、下板及び中央板の間で、それぞれ 3 成分力センサとトル

^{*1} 学生員, 名古屋工業大学大学院 工学研究科 機能工学専攻

^{*2} 正員, 名古屋工業大学 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

E-mail: ciq16525@stn.nitech.ac.jp

クセンサを同軸上に挟み込むことによって、軸力 F 、座面トルク T_b 及びねじ部トルク T_{th} を分離して測定できるような構造になっており、試験用ボルトの円筒部に貼付けたひずみゲージ、及びナットランナにより外部から測定されるねじ部トルク T_{th} 及び締付けトルク T の値をそれぞれの真値（参照値）と仮定し、圧電式センサで得られる測定値と比較する。

Fig.1 The testing machine using piezoelectric sensors

2・2 実験結果及び考察

図1に示す試験機の構造上、圧電式センサで検出される値には締付け試験時の上下板の変形及びプリロードボルトの剛性に起因する圧電式センサの感度変化や、軸力の干渉（cross talk）が含まれると考えられるが、これらは次式により補正可能であるとされている⁽²⁾。

$$\begin{cases} T_{th} = \kappa_{th} (T_{th}^* - \varepsilon_{th} \cdot F) \\ T_b = \kappa_b (T_b^* + \varepsilon_b \cdot F) \end{cases} \quad (1)$$

ここで、 T_{th}^* 及び T_b^* は圧電式センサで出力される値、 κ 及び ε はそれぞれ、圧電式センサの感度変化に関する補正係数、及びクロストークに関する補正係数である。

図2は、圧縮試験機により測定用ボルトの頭に軸方向荷重をかけたときの圧電式センサの出力値（クロストーク）を示している。荷重が負荷されるとプリロード用ボルトの軸力変化が起こるため、圧電式センサ面上に追加される軸力はそれらの差分となるが、クロストーク量には各センサによって差があり、さらに軸力に比例しない非線形成分が含まれているため、測定誤差要因を排除するためには式（1）の係数 ε_b の変化（非線形特性）を考慮する必要があることがわかる。

図3に、図2に示すような ε_b の変化を考慮した場合の圧電式センサの測定値の補正結果を示す。参照値と測定値（補正結果）を比較すると、ねじ部トルク T_{th} に関しては、両者は精度よく一致しているが、座面トルク T_b に関しては、ゆるめの過程で、締付けトルク T 又は座面トルク T_b が0となる付近（図のA付近）から誤差が生じることが分かった。上下のセンサによるトルクの分離測定の基本原理は同一であるが、座面側のセンサに作用するせん断力の合計は、ねじ部側の1/2以下であり、またセンサやプリロード用ボルトの配置が異なっているため、締付け試験時の圧電式センサにかかるせん断応力分布の変化が測定感度に影響を及ぼしている可能性がある。そこで以下では、締付け試験機の座面側の測定系をモデル化し、締付け／ゆるめ過程において、圧電式センサにかかるせん断力分布がどのように変化するかを調べることにする。

Fig. 2 The cross talk of the 3-component sensors placed in the testing machine

Fig. 3 A result of tightening experiment compensated by Eq.(1)

3. 座面トルクの測定系の検討

図4は、図1に示す試験機の座面側の測定系を解析するためのFEモデルである。モデルの各部の寸法は、試験機の実寸法と同じにし、センサ部に関しては、3成分力センサの剛性のカatalog値(約2.6 kN/μm)とおおよそ一致するように材料特性を設定した。また、測定用ボルトに相当する部分と上板は一体となっており、上板に直接座面トルクを与えられるようにしている。解析は、センサ部の下端を固定端として以下の手順および方法によって行った：

- 各プリロード用ボルトに軸方向変位を与え、プリロードを($pL=10$ kN)発生させる。
- 測定用ボルトに軸方向変位を与え、軸力($F=10$ kN)を発生させる。
- 測定用ボルトに締付け方向の角変位を与え、座面トルク($T_b=10$ Nm)を発生させる。
- 測定用ボルトに反対方向の角変位を与え、座面トルク($T_b=-10$ Nm)を発生させる。

Fig. 4 FE model

図5に、図4中のAのセンサ部(円環状の部分)にかかるせん断応力分布の計算結果を示す。締付け試験では、プリロードをかけた時点基準としているため、図5(a)の状態が締付け試験前の状態を表しているが、このとき、既にセンサの感度方向(図の上下)に大きなせん断応力が発生していることが分かる。次に、図5(b)のように軸

力をかけると、上板がたわむことによってセンサ部の測定用ボルト側（図の右側）にせん断力が発生することがわかる。センサが正しく配置されていれば、試験用ボルトの軸力の変化による座面トルク T_b の検出方向にせん断力はほとんど発生しないと考えられるが、センサの位置誤差などがあると、センサ表面にせん断力が発生し、測定値に影響を及ぼすおそれがある。したがって、軸力作用時に上板が、たわみ変形を起こさず、センサ面上に均一に圧力が負荷されるような構造を考える必要がある。また、図 5(c)では、測定用ボルトに座面トルクを作用させてセンサ表面にせん断力がかかる様子を示しているが、上板がたわみの変形をしていることもあり、追加されるせん断応力の大きさに偏りが見られる。この偏りは、反対方向のトルクが作用する図 5(d)の場合でも同様であるが、締付け試験では軸力とトルクの関係が複雑に変化するため、このことがセンサの測定感度に影響を及ぼし、図 3 の A 付近から κ を定数として誤差を補正できない問題が生じさせている可能性がある。

図 7 は、試みに上板の形状を図 6 のように変化させ、図 5 と同様の解析を行った結果である。締付け試験前の図 7(a)の状態を基準として考えて、センサを正しく配置すれば図 7(b)のように測定用ボルトの軸力が変化することによってセンサの感度方向に発生するせん断力はほとんど発生しないと考えられる。そして、図 7(b)や図 7(c)のように測定用ボルトにトルクがかけられることによってセンサ表面に作用するせん断応力の分布は図 5 と比べると変化しており、上板形状やプリロード用ボルトの位置に影響されることがわかる。センサにかかる圧力やせん断応力分布の偏りはセンサの感度に影響すると考えられるため、現行の試験機に組込まれた座面トルク T_b を測定するセンサの特性を詳しく把握するとともに、上板などの試験機の構造をさらに改善していく必要がある。

Fig. 5 Shear stress distribution on the sensor surface

Fig. 6 FE model

Fig. 7 Shear stress distribution on the sensor surface

4. 結 語

本研究の結論は以下のとおりである。

- (1) 試験機に組込まれた圧電式センサの測定値に含まれる感度変化やクロストークの影響を(1)式を用いて補正を試みた。
- (2) 座面側の圧電式センサの測定値において、クロストークの非線形特性を考慮して補正しても、試験用ボルトのゆるめ過程のうち、締付けトルク T が 0 となる付近から(1)式で補償できない問題が生じた。
- (3) (2)の結果について試験機座面側をモデル化し、FEM 解析を行った。3 成分力センサにかかるせん断力分布の偏りがセンサの測定感度に影響すると考えられ、座面側の測定系の特性について詳細に検討すると共に、試験機構造の改良が必要であると考えられた。

文 献

- (1) 萩原正弥, “ねじ部品の締付け方法の ISO 規格について”, 機械設計, 50 巻 1 号(2006), pp. 24-28.
- (2) Masaya HAGIWARA et.al, “Development of a New Testing Machine for Torque/Clamp Force Testing for Threaded Fasteners in Accordance with ISO 16047”, *Journal of Advanced Machine Design, Systems, and Manufacturing*, Vol.3, No4(2009), pp.328-332.
- (3) 萩原正弥ほか 4 名, 2004 年度日本機械学会年次大会講演論文集, Vol. 4, (2004), pp. 243-244.
- (4) 萩原正弥ほか 4 名, 2006 年度日本機械学会年次大会講演論文集, Vol. 4, (2006), pp. 315-316.