研究論文

六角穴付きボルトの軸力検出法に関する研究*

清水 伸 二** 小林 康 記*** 岡 部 眞 幸**

The Method of Axial Tension Detection for the Hexagon Socket Head Cap Screw

Shinji SHIMIZU, Yasunori KOBAYASHI and Masayuki OKABE

In this paper, the behaviour of the bolt head deformation of the hexagon socket head cap screw in connecting is examined in detail by the finite element method, and then the method of the precise and direct axial tension detection which is impossible so far, is proposed using its deformation characteristic. The main results are as follows: (1)The bottom of the hexagon socket makes sinking deformation in nearly parallel. (2)The change in the distance between the fixed position of the sensor in the socket and the bottom of the socket is in good proportion to the bolt axial tension. (3)The detecting method of the axial tension using this relation makes possible to detect directly and precisely the axial tension of the hexagon socket head cap screw. (4)The influences of the angular position of the sensor to the hexagon socket and the fixing position in the socket on the sensor sensitivity are small. (5)The influences of the materials and hole diameter of the washers are small and that of the parallelism of them is great. And in the case of standard washers, the influence of the eccentricity of them is small.

Key words: bolt, hexagon socket, hexagon socket head cap screw, axial tension, sensor, bolt head deformation, finite element method

1. ま え が き

ボルト締結部は、分解、組立、調整が容易なことから、多くの産業分野で採用されている。それらの中で、航空宇宙、自動車、建設、橋梁、鉄塔、原子力などの分野では、ボルトの破壊、緩み防止といった安全性の面から、軸力の管理が重要視されてきた。一方、工作機械をはじめとする精密機械分野では、それらの高性能化に伴い、その精度及び機能の面から、軸力管理の重要性が認識されるようになってきている。このように各分野における様々な要求に対して、それぞれ適正な締付力が存在しており、それらを実現するため、トルクレンチ方式¹⁾、超音波方式²⁾、磁気方式³⁾、ひずみゲージ方式⁴⁾、渦電流方式⁵⁾など多くの軸力管理法が提案されている。これら各種方法の六角穴付きボルトへの適用性について見てみると、六角棒スパンで締付けるといった使用方法や特殊な頭部形状、さらに頭部

を座ぐり穴に沈めて使用するなどの理由から、前述の方法の中でトルクレンチ法以外の方法がほとんど適用できない。しかし、トルクレンチ法の精度は、ねじ部ならびに頭部座面の摩擦係数により締付けトルクが大きく左右されるので正確な軸力管理法としては問題が多く、より高精度で、直接的に軸力を検出する軸力検出法の開発が望まれている。

そこで本研究では、締付けにともなうボルト頭部の変形を有限要素法により詳細に解析し、その変形特性の軸力検出への応用の可能性を検討するとともに、従来不可能であった六角穴付きボルトの直接的な軸力検出を、より高精度に行う方法を提案し、その有効性について検討する。また、実用化も考慮して、各種因子の軸力検出への影響についても明らかにする。

2. 六角穴付きボルトの頭部変形特性

図1は、締結状態にある六角穴付きボルト締結部を模式的に示したものである。六角穴付きボルトは、頭部を座ぐり穴に沈めて締付けることも多く、この場合頭部変形の軸力検出への応用が可能な部分は、ボルト頭部上面ならびに六角穴のみと言える。そこで、これ

* 原稿受付 平成元年8月16日。昭和63年度精密工学会春季大会学術講演会(昭和63年3月17日)にて発表

** 正会員 上智大学理工学部(東京都千代田区紀尾井町7-1)

*** 正会員 日本ビクター(株)(横浜市神奈川区守屋町3-12)

Fig.1 Schematic model of bolted joint

らの二つの部分についての締付け時の変形挙動を、頭部座面、座金、締結体間の接触境界条件を考慮にいれ、有限要素法により詳細に検討した。なお解析は三次元軸対称問題として行い、六角穴部は二面幅と対角距離の平均値を直径とする穴として近似した。図2は、M14の六角穴付きボルトについて、ボルトの軸力を増加していったときの、頭部上面と六角穴部分の各軸力での変位を表したものである。図を見ると、ボルト頭部は軸力の増加にともない全体が沈み込みを起こしている。また、頭部六角穴内面では絞り込まれるように変形しているが、穴底の部分ではより大きな平行へこみ変形となっている。そこで、頭部変形のなかでも、この六角穴底部のへこみ変形を軸力検出に利用することの可能性について、次に検討する。

図3は、この変形量 Δh を縦軸にとり、軸力を横軸にとって、両者の関係について検討したものである。ただし変形量 Δh は、前出の図1のボルト締結状態の模式図に示してあるように、六角穴入口部を基準とした穴底部までの距離 h の締付けにともなう変化量(= $h_1 - h_0$)である。図より軸力と Δh が、非常に良い比例関係を示すことがわかり、頭部六角穴入口部を基準として穴底部までの距離の変化量を正確に測定できれば、精度良く軸力が検出できるものと考えられる。また、前述のように、その検出部である六角穴底部がほぼ平行へこみ変形挙動を示すので、穴底中心に対する高い位置決め精度も要求されないものと思われる。

3. 六角穴付きボルトの軸力検出法

締付け時の六角穴付きボルトの軸力を検出するため、2章で明らかとなったような六角穴底部の変形を検出するセンサを試作した。センサは図4に示すように、

Fig.2 Relationship between bolt head deformation and axial tension
Bolt : M14, Washer : 14 (nominal dia.) Fig.3 Relationship between bolt head deformation and axial tension
Bolt : M14, Washer : 14 (nominal dia.)

ボルトを締付ける際に六角レンチの役割を果たす部分(以下締付部と呼ぶ)と、ボルトの穴底部の変形を検出する素子を保持する部分(以下検出素子保持部と呼ぶ)から構成されている。締付部本体には、大小二つの六角部があり、小さい方の六角部をボルトの六角穴に差し込み、大きい方の六角部にスパナをかけて締付ける。その際の穴底部の変形量を、検出素子保持部中心に組込んだ変位検出素子(渦電流式変位センサ)により検出する。

センサ本体は、締付け前に、センサ内部に組込んだクランプ機構を用いてボルト頭部に固定する。このク

Fig.4 Sensor construction

ランプ機構として、締付部本体とロックボルト間のテーパ及びねじ機構により本体の小六角部をボルト頭部六角穴内で押し広げクランプする方法を採用している。この機構により締付け時に頭部変形量測定の基準が変化しないようにしている。

このようなクランプ機構から予測できるように、この基準位置（センサ固定位置）は、前述のような六角穴入り口部にはならず、図5に示すように、穴入り口部より距離 d だけ穴底側でクランプされるものと考えられる。また、軸力検出対象は市販ボルトであるので、頭部頂面を正確な基準面としては利用できないことから、その固定位置も、センサの着脱の度に多少異なるものと思われる。これらの影響について検討を行ったのが、図6である。図は、固定位置の六角穴入り口部からの距離 d をパラメータとして示してある。 d が大きいくほど検出対象である変形量 Δh （センサ検出量）が小さくなり、センサ感度が低下することを示している。しかしながら、製作したセンサ寸法から、クランプが主に行われると考えられる6mm前後の位置で、固定位置が0.5mmばらついても、傾きの変化は3%程度と小さいことがわかる。したがって、六角穴深さ方向のセンサ固定位置の影響は比較的小さいと言える、安定した固定機能があれば、多少、センサ固定時の測定基準位置がばらついても、感度の変化は小さく、正

Fig.5 Sensor clamping position

Fig.6 Influence of sensor clamping position on amount of deformation to be detected

確な軸力測定が可能と考えられる。

一方検出素子保持部は、変位検出素子をその測定保証範囲内(200~700 μm)に設定するためのもので、ねじによる送り機構とそのバックラッシュを取り除くためのスプリングで構成され、変位検出素子の正確な位置決めが行えるようになっている。

4. 検出法の評価方法

ここで提案した検出法を評価するための装置の構成を図7に示す。これはボルトにかける軸力を正確に検出、設定するための装置である。装置の中心部の軸にボルトをねじ込み、締付けると、この軸に引張力が働くようになっている。この力を軸の下部に貼ってあるひずみゲージにより検出し、必要な軸力を設定した。評価手順としては、2.5kNずつ15kNまで締付けて行き、その時の軸力センサの出力と設定軸力の関係を最小二乗法を用いて求め、そのときの傾きをセンサ感度として評価に用いた。

Fig.7 Schematic diagram of experimental apparatus

評価用のボルトは、すべて呼びM14(JIS B1176)、強度区分12.9、材質SCM3の市販の六角穴付きボルトである。また座金については、材質(SS41磨き、SS41めっき、黄銅)、穴径(各々の材質において15,16,17,18 mm)、傾き(0, 0.2, 1, 2, 3°の傾きをつけたS45C製のもの)などを変えて、それらの影響について検討を行った。

5. 評価結果

5.1 軸力検出のための基本性能

試作したセンサの基本的な出力特性を図8に示す。センサ出力と設定軸力が良好な線形関係にあり、直線性も良好なことから、ここで提案した検出法により六角穴付きボルトの軸力検出が基本的に可能と考えられる。そこでさらにその基本性能について評価を行った結果を表1に示す。1本のボルトに対する評価は、センサを取付け、固定したままの場合と、着脱を繰り返した場合について、センサの出力感度ならびに直線性について行った。センサを取付け、固定したまま行う評価は、センサ出力の再現性について検討するためであり、センサの着脱を繰り返して行う評価は、実際の使用時を考慮して、センサのクランプ状態やクランプ機構の性能も含めて評価するためのもの

のである。その結果、センサ感度は固定で最大ばらつき2.5%、精度2.1%と非常に良好であり、着脱を行っても最大ばらつきで5.8%、精度3.71%と良い結果が得られ、クランプ機構の性能も良好であることが示された。

また、多数のボルトより任意に選んだ10本に対する評価では、感度の最大ばらつき13.6%、精度9.1%と、精度が多少悪くなっている。これは、ボルト頭部の形状誤差、六角穴の形状誤差によるクランプ性能の変化などの影響と思われる、クランプ面の当りを改善するなど、クランプ機構を改良することにより、さらに精度を向上できるものと考えられる。

以上のように、精度的には市販ボルトを対象とした評価で10%以内となっており、ここで提案した軸力検出法は基本的に有効な方法と言える。

5.2 各種因子の軸力検出への影響

5.2.1 六角穴に対するセンサの角度位置

ボルト頭部六角穴の形状誤差により、クランプ部のクランプ面の当り状態が変化し、クランプ性能が変化

Fig.8 Relationship between sensor output and axial tension

Table 1 Sensor performance

Bolt condition	Sensor setting condition	Characteristics of sensitivity				Linearity [%]
		Average S mV/kN	Range R mV/kN	Dispersion R/S %	Standard deviation σ mV/kN	Accuracy $2\sigma/S$ %
Single bolt	F	1.23	0.031	2.5	0.0131	2.1
	R	1.23	0.063	5.1	0.0186	3.0
Many bolts	R	1.16	0.158	13.6	0.0531	9.1

F: Fix, R: Repetitively set up and down, Washer: SS41 Polished

Fig.9 Influence of sensor angular position

するものと思われる。また同様の理由でセンサの検出要素が常に同じ位置の変形を検出するとは限らない。そこで、これらの影響について検討を行うため、ボルト頭部の六角穴に対してセンサを6通りの角度位置で固定し、それぞれの位置での感度の評価を行った。その結果を各位置での10回の平均感度で示したのが、図9である。これより、センサ位置を変えたときの各位置での平均感度のばらつきは約2.5%であり、六角穴の形状誤差による影響が小さいことがわかる。しかし、6箇所所得られた全データから求めた感度のばらつきでは、7.4%とややばらつきが大きくなった。これは、センサの位置を変えた直後においては、感度が多少ばらつく傾向を示すことから、ボルト頭部六角穴とセンサの六角部との間のクランプ状態が多少不安定なためと考えられる。

この現象は、クランプが安定するまで、慣らし締めとして低い軸力で2、3回の締付けを行うことにより改善できることが明らかとなっており、六角穴に対する取付位置の影響は比較的小さいと言える。

5.2.2 座金材質

図10は、座金材質がセンサ出力に及ぼす影響について検討した結果である。六角穴付きボルトは、座金を使用せずに用いる場合も多いが、被締結体の材質も目的に応じて各種のものが用いられるので、頭部変形もその影響を受ける可能性がある。このような場合も考慮に入れて評価を行うため、座金はいずれも市販のものをを用い、材質はSS41（磨き、めっき）と黄銅のものをについて検討した。図からもわかるように、そ

Fig.10 Influence of washer material

Fig.11 Influence of washer hole diameter

の影響は2%程度と小さく、座金材質を変えてもボルト頭部の変形特性には、ほとんど影響がないと言える。したがって、締結体材質の影響も比較的小さいと思われる。

5.2.3 座金の穴径

座金は、その種類により穴径が異なる。また、被締結体のボルト穴径がばらつく可能性もある。このような影響について、前出の3種類の座金を用いて検討した結果が図11である。図は、穴径を15, 16, 17, 18mmとしたときのセンサ感度を穴径15mmのときの感度に対する比をとって示してある。どの座金材質に対しても穴径を大きくすると感度は下がる傾向にある。これは、座金穴径が広がることにより、六角穴底部周辺の局所変形よりは、頭部全体の変形が起りやすくなるため、センサ固定基準位置と穴底部の変位差である変形量 Δh が生じにくくなったことによると考えられる。しかしながら、センサ感度の低下は3%程度であり、座

Fig.12 Influence of washer eccentricity
Washer : SS41 Polished

金穴径やボルト穴径の影響は小さいと言える。

5.2.4 座金の偏心

締付け時の座金のずれ、ボルト穴のピッチ誤差や位置誤差によりボルト軸心が穴の中心と一致しない場合がある。そこで穴径 15, 16, 17, 18mm の座金を最大に偏心させ、これがセンサ感度に及ぼす影響について検討した結果を図 12 に示す。図を見ると、座金の偏心による感度低下は穴径 18mm の座金の際の偏心量 2mm においても 4% 程度と比較的小さい。また実際に使用される座金の穴径およびボルト穴径は 15, 16mm が多く、その最大偏心量がボルト頭部変形へ及ぼす影響は小さくなるとともに、感度低下もより小さいと言える。

5.2.5 座金の平行度

ボルトならびに座金の形状誤差によりボルト頭部座面において片当たり的な接触が起こり得る。このような影響について、座金面に傾き (0, 0.2, 1, 2, 3°) をつけた S45C 製の座金を用意し検討した結果が図 13 である。図は、縦軸に傾き 0° のときの感度に対する比をとり、横軸に傾き角をとって示してある。図を見ると、傾きが大きくなるにしたがい感度は低下する傾向にあることがわかる。また 0.2° 傾けた座金でも 5% の感度低下があり座金の平行度の影響は大きいと言える。これは、ボルト頭部座面における片当たりにより、主に頭部の首下部に曲げ変形が生じ、軸力検出のための測定部である六角穴底部の変形が生じにくくなるためと思われる。

6. ま と め

これまで困難とされていた六角穴付きボルトの軸力

Fig.13 Influence of washer parallelism

を直接的に検出する方法を確立するため、締付け時の頭部変形を有限要素法により詳細に解析し、その変形挙動を明らかにするとともに、その特性を利用した軸力検出方法を提案しその有効性について検討した。その結果、以下の事項が明らかになった。

- (1) 締付け時の六角穴付きボルト頭部は、六角穴底部では、ほぼ平行な沈み込み変形挙動を示す。
- (2) この変形において、締付けにともなう六角穴の入口部を基準とした穴底部までの距離の変化量 Δh は、軸力と良好な線形関係を示す。
- (3) 以上の関係を利用した軸力検出法は、従来困難とされていた六角穴付きボルトの直接的な軸力検出を可能なものとした。
- (4) ボルト頭部六角穴に対するセンサの角度位置及び六角穴深さ方向の固定位置の影響は、比較的小さい。
- (5) 座金に関しては、材質、穴径は検出感度にはほとんど影響しないが、傾きの影響は大きい。また、標準の穴径の場合では、座金の偏心の影響は、ほとんどない。

参 考 文 献

- 1) 晴山蒼一：トルク法によるねじ締付けにおける軸力管理に関する研究（第一報、ねじ軸力分布の信頼限界について）、日本機械学会論文集（C編）、53,495(1987) 2373.
- 2) 牧野孝之、酒井智次、島山晴彦：超音波を利用したボルト軸力測定装置の開発と実用化、精密機械、43,2(1977) 223.
- 3) 森 忠夫ほか：磁気的方法によるボルト軸力の測定、日本機械学会論文集（A編）、47,413(1980) 102.
- 4) 西村 昭ほか：既設高力ボルトの軸力測定とその誤差について、土木学会関西支部年次学術講演会講演概要（1980）1-28.
- 5) 清水伸二、小林康記、岡部眞幸：ボルト軸力センサの開発、精密工学会誌、54,7(1988) 1357.