コンプライアンスに基づくねじの 自動的軸力管理*

—トルク係数によらないトルク法について—

賀 勢 晋 司** 松 岡 浩 仁** 須 古 星 武 志***

An Automatic Axial Tension Control of Bolted Joints by Utilizing
Compliance Value
—Calibrated Wrench Method not Based on Torque Coefficient—

Shinji KASEI, Hirohito MATSUOKA and Takeshi SUKOBOSHI

This paper deals with experimental considerations on the method of axial tension control in elastic region which was proposed by the authors et al. Characteristic points of the method are summarized as follows: (1) the value of compliance in the axial direction of a bolted joint is utilized to be the basic parameter instead of the torque coefficient, (2) the control is performed by basing on a final fastening torque predicted in a fastening process. A fastening apparatus constructed consists of a DC servo-motor and a single board micro-computer, having functions of sensing the fastening torque and the axial tension and controlling the ends of fastening. From the experimental results on accuracy and response in the method, it comes out that the method brings higher accuracy in the axial tension control than the calibrated wrench method widely known and used at present. In addition, it is suggested that the method becomes available by performing a preliminary test to gain an exact value of the compliance.

Key words : bolted joints, axial tension control, modified calibrated wrench method, compliance value, in-process prediction, control accuracy

1. 緒 言

ねじ締結の信頼性の向上を図る上で、軸力管理は大切な課題である。しかし、通常の場合、軸力そのものを管理することができないため、軸力に関係した量を取り上げ、それを管理する必要がある。この場合、大きく分ければ、弾性域内の締付けを目指すものと塑性域内を目指すものがあり、既にいくつかの方法が研究開発されてきた¹⁾²⁾。最もよく知られ、弾性域を前提として多用されるのがトルク法である。トルク検出は比較的容易であり、トルク法は弾性域締付けには欠かせないが、ねじ面・座面の摩擦状態に直接影響されるため、軸力管理精度に大きな問題を残している³⁾。

本研究では、弾性域締付けで締付けトルクを実際の管理値とする点ではトルク法に立脚しながら、摩擦に直接影響されない方法として、締結体のコンプライ

アンスを基本値とする軸力管理法を検討する。締結体が決まれば、コンプライアンスそれ自身には摩擦係数の場合のような大きなばらつきはないはずであり、それだけ軸力管理精度の向上が期待できる。これには締付過程における演算による予測締付けの機能を持たせ、ロボット等における自動締付けの一方法としたい目標がある。なお、コンプライアンスを用いる点では回転角法¹⁾と同じではあるが、同法にある角度検出の開始決定の問題が避けられ、より高精度の締付けができると考えられる。

この方法についての基礎実験結果は既に報告⁴⁾したが、今回はそれを発展させ、新たにより実地的な締付装置を製作し、軸力管理精度や実用上の問題についてより広く検討している。

2. 軸力管理の原理

図1に軸力 F と締付けトルク T の関係と本研究の方法の概略の説明を示す⁴⁾。ここでは、 T は F に対し、単調増加の関係にあることを前提としている。⑤はトルク係数 K を K_0 とした便宜上の基準直線、⑧

* 原稿受付 平成元年12月4日。1989年度精密工学会秋季大会学術講演会(平成元年11月5日)にて発表

** 正 会 員 信州大学工学部(長野市若里500)

*** ジャープ(株)(八尾市北亀井野3-1-72)

Fig. 1 Diagram of fastening method

は実際の関係曲線とする。\$F_c\$を目標軸力とすると、従来のトルク法では\$T\$の目標値が\$T_s\$となり、得られる\$F\$は\$F_c'\$となる。

本研究では、締付過程は初期段階を過ぎれば一般に安定した\$T, F\$関係を示すことに着目し、\$T=T_1, T_2\$に対応した点\$P, Q\$を代表点とし、それらを通る直線④で⑤を近似する。\$T_1, T_2\$は締付作業上、各々予測開始、終了トルクとなる。以上より、目標の\$F_c\$を得るための\$T\$の目標値\$T_R\$は次式で与えられる。

$$T_R = K_R d F_c + T_0 \quad (1)$$

ここで、\$d\$はボルト呼び径である。

予測開始トルク\$T_1\$はねじ締結各部の接触状態が安定化し始める値\$T_{sn}\$より大きな値に設定する。しかし、\$T_{sn}\$は一定ではなく、理論的に決めることはできないものであるから、その値の目安の範囲を従来の実験データから知ることが望ましい。予測終了トルク\$T_2\$は\$T_1\$を決めた後で、予測幅\$\Delta T (= T_2 - T_1)\$があまり狭くならないように設定する。\$\Delta T\$は広い程一般に曲線\$R\$の特性を平均化して利用できるため良いが⁴⁾、広く取り過ぎると、\$T_R < T_2\$となる可能性が生じ、\$\Delta T\$の見直しが必要となる(表1の2(2)参照)。

式(1)において、\$T_0\$は⑤の形状と、\$T_1\$及び\$T_2\$によるため、実際に決めることは困難であること、実験データ⁵⁾より、通常は大きな影響を与える程のものと考えられないことから、\$T_0\$を簡単のため無視する。なお、\$T_0\$の無視は図1において直線④の代わりに⑤を用いることに対応し、誤差要因となる。

\$K_R\$は締付回転角\$\theta\$の\$\Delta T\$間の変化\$\Delta \theta\$と締結体の軸方向コンプライアンス\$\delta\$より次式の関係で求める。

Fig. 2 Explanation drawing of fastening apparatus

$$K_R = \frac{\Delta T}{d \cdot \Delta F} = \frac{2\pi \delta}{dP} \cdot \frac{\Delta T}{\Delta \theta} \quad (2)$$

ここで、\$P\$はねじのピッチであり、締付角速度\$\omega\$を一定に制御する場合には時間間隔\$\Delta t\$を用いれば、\$\Delta \theta = \omega \Delta t\$とすることができる。

3. 締付装置と軸力管理プログラム

3.1 装置の構成

図2にワンボード型のマイクロコンピュータ(以下、マイコン)を軸力管理の制御部とした締付装置の概要を示す。

締付けの駆動には、ハーモニックドライブ方式の減速装置を内蔵するDCモータ(66 W)を用いる。このモータは速度制御が可能で、ねじ締付過程でも速度変動がないとすることができることを確認して用いている。

締付けトルク\$T\$の検出には、モータの支持部に設けたトルクセル\$A\$からの信号\$T_a\$を当てる。また、締付物の支持部にもトルクセル\$B\$を設け、信号\$T_b\$により適時に\$T_a\$を確認する。なお、\$A, B\$は円筒形状を持ち、ひずみゲージをセンサとしている。

研究上、軸力\$F\$を知ること必要であるから、ボルトから直接軸力を検出する(3.2項参照)。

2章で述べた方法に基づくプログラムをROMに書き込み、マイコンを作動させる。マイコンのMPUはZ80 A(8 bit)であり、I/Oポート、ADコンバー

Fig. 3 Part to be fastened and bolt-nut

タ, CTC ボード及び RS 232 C インタフェースを備える。I/O ポートはモータのドライバユニット, キーボード, LED 部と接続し, AD コンバータは 8 bit であり, T_a (T_b) 及び F の 1 bit 対応量は, 各々 0.165 Nm, 95.8 N となる。CTC ボードはデータサンプリングのプログラマブルタイマとして用いる。

図中のパーソナルコンピュータは RS 232 C インタフェースを介してマイコンにつながる支援装置として, 主に T_R の予測演算値や最終軸力値の収録用となる。

モータの操作については, 締付開始 (On) と締付終了 (Off) のみをマイコン指令し, 締付け前の速度調整, 正・逆転の設定及び軸力管理に無関係の On・Off は手動操作として実験を行いやすくした。

3.2 被締付物とボルト・ナット

図 3 に被締付物とボルト・ナットの様子を示す。被締付物の材質は S 45 C で, 3 種の寸法形状として互いにコンプライアンスに違いを持たせた。ボルト・ナットは M 10 とし, 強度区分は各々 8.8, 8 である。

図のようにボルト軸部内にはパイプ状ひずみゲージを埋め込み, 軸力 F を確実に検出できるようにする。このようなボルトを各締付物ごとに数本ずつ用意したが, 後述の実験においては 1 本ずつを通して用いた。

また, ボルト・ナット座面部には平座金 (熱処理, 研削) を入れ, 多数回の締付けによる被締付物座面の損傷を防止する。

3.3 軸力管理プログラム

プログラムでは, 一定周期でサンプリングされる締付けトルク T_a の値を常に監視し, それが T_1 と T_2 の間にある時間 Δt をサンプリング回数とその周期から求める。その後, 式 (2), (1) より軸力管理用の目標トルク T_R が演算予測され, 締付けトルクが T_R に達すれば締付作業が終えられる。

表 1 にプログラムの要点として設定入力値と管理条件をまとめる。管理条件の (1) は上述の場合であるが, (2) は T_2 が大き過ぎる場合, (3) は締付けトル

Table 1 List of input variables and control conditions

1. Input variables
(1) F_c , (2) T_1 , (3) ΔT , (4) K_s , (5) $\alpha (= P/2\pi\delta)$, (6) ω , (7) d , (8) Data sampling interval t_s , (9) Allowable max. torque T_{max}
2. Control conditions
(1) $T = T_R$; Fastening completed
(2) $T_R < T_2$; Fastening stopped
(3) $T > T_{max}$; Fastening stopped

クが許容トルク以上になる場合で, 締付状態あるいは軸力管理に不具合がある場合に当たる。(2), (3) になった場合には T_1 , ΔT の再検討や不具合の抽出と改善が必要である。なお, 設定入力値の中の K_s は式 (2) による K_R と比較して締結の異常や管理操作の不具合を検出するために用いられるもので, トルク係数について従来より知られる概略の値を与えておく。

4. 軸力管理実験とその結果

4.1 実験の種類と条件

大別して二つの実験を行う。一つは目標軸力 F_c を一定に設定して, 表 1 の α , T_1 , ΔT 及び ω と新たにねじ面・座面に与える潤滑油を変え, 軸力管理精度を検討する実験 (E 1) と, ほかに F_c を段階的に変え, 得られた最終軸力が目標に対してどう応答するかを検討する実験 (E 2) である。

表 2 に E 1 の場合について, 15 の実験群として整理した個別条件と, それに加えて共通条件等を示す。上述の α は表 1 に示す通りコンプライアンス δ に反比例するもので, 被締付物 (CP) の番号で与える。 T_1 については, T_{sn} はせいぜい最終締付けトルクの 2 割程度には納まると考えて⁶⁾, それ以上に設定し, ΔT は 9.8 Nm 以上に決めている。潤滑油には 3 種用意する。

ここで, 本実験の場合について締付け最終時のトルク係数の平均値を前もって示すと,

マシン油の場合: 0.170

スピンドル油の場合: 0.228

MoS₂ + スピンドル油の場合: 0.114

である。

締付回転速度 ω は従来のねじ締結実験⁷⁾等を参照し, 5 rpm を主なものとして 10 rpm までとする。

共通条件では, F_c を 19.6 kN とし, 概略値でよいトルク係数 K_s には 0.18 を設定する。サンプリング周期 t_s はプログラムの実行時間とデータサンプリングの必要回数を考慮して決めた。

基本値となるコンプライアンス δ は, 各締付物と

Table 2 Experimental conditions

No. of experiment	No. of CP	T_1 Nm	ΔT Nm	Lubricant	ω rpm
1	①	9.8	14.7	(M)	5
2	②				
3	③				
4	①	19.6	14.7	(S)	
5	②				
6	③				
7	①	7.8	9.8	(MS)	
8	②				
9	③				
10	①	9.8	14.7	(M)	
11	③				
12	①				
13	③	14.7	14.7	(S)	
14	③				
15	③				
		9.8		(M)	2 10

(M) : 120 machine oil, (S) : Spindle oil, (MS) : MoS₂ + (S)

Common	$F_c=19.6\text{kN}$, $K_s=0.18$, $d=10\text{mm}$, $P=1.5\text{mm}$, $t_s=2.048\text{ ms}$
Others	$\delta=4.7\times10^{-6}\text{ mm/N}$ (CP : ①) $5.1\times10^{-6}\text{ mm/N}$ (CP : ②) $6.2\times10^{-6}\text{ mm/N}$ (CP : ③) Exp. 1-9 : Without renewal of nut during each experiment Exp. 10-15 : With renewal of nut at each fastening Sample size : 30 in each exp. of 1-3, 25 in each exp. of 4-6, 15 in each exp. of 7-15

ボルト・ナットの組合せにおける締付回転角 θ と軸力 F に対する数回ずつの予備実験より求めた値を用いる (5章参照)。また、実験番号 1~9 では各番号の実験中、一つのナットを更新せず使い、10~15 では反対に 1 回ごとと更新する。標本数は表中に示す通りで、合計 300 である。

実験 E2 においては、表 2 の実験番号 10 に対応する条件で中心を 19.6 kN とし、段階幅 1 kN で 5 段階の目標軸力を設定し、順序をランダム化して 25 回の実験を行う。

なお、以下に結果を示す実験では表 1 の管理条件 (2), (3) に該当する場合は起こらず、すべて正常と判断される締付けが行われた。

4.2 実験結果と考察

図 4 に締付過程における軸力 F と締付けトルク T の関係についての実測例を示す。これはデータ検出の様子を検討するもので、この場合、締付開始から終了まで F , T について多数回のデータサンプリングと記

Fig. 4 Example of measured relation between axial tension and fastening torque

Fig. 5 Generalized experimental results of finally obtained axial tension

憶等を行うため、図 2 のシステムとは異なり、マイコンを用いず、パソコンを直接の援用装置としている。図によれば、問題点は認められず、妥当な検出結果が得られているものと思われる。また、式 (1) における T_0 に対応する量が小さいことがわかり、それを無視しても影響は少ないと考えられる。

図 5 に実験 E1 について三つの項目に整理した結果を示す。3 項目とは、軸力管理により得られた最終軸力について、母平均 μ_F 及び母標準偏差 σ_F の 95% 信頼区間推定⁸⁾と変動係数 h_F であり、比較のため、最終軸力と最終締付けトルク ($= T_R$) から求められる実際のトルク係数 K についての変動係数 h_K も示す。ここで、変動係数は標本についての標準偏差と標本平均の比であり、相対的なばらつきを検討するために用いる。

図 5 によると、コンプライアンス、潤滑油及び締付

Fig. 6 Experimental result of response test of axial tension control

速さを変化させても全体的にかなりよく軸力管理が行われていると思われる。二硫化モリブデンを用いて潤滑状態を大きく変えた場合に μ_F が目標から10%以上はずれた例(実験番号7)もあるが、それを除けば $\pm 10\%$ 以内に十分入っている。各実験番号で同一ナット使用の場合(実験番号1~9)とナット更新の場合(10~15)を比較すると、後者の場合の方が全体として σ_F が大きく、ばらつき範囲が大となっている。これはナット個々が及ぼす影響であり、この方が実際の締結に対応しているが、それでも σ_F は一例(実験番号13)を除き、ほぼ1.5 kN以下である。

h_F と h_K を比較すると、すべての場合に前者が小さく、しかも多くの場合に大きく下がっている。このことは、トルク係数に頼って従来のトルク法により軸力管理するより、本研究の方法で管理する方が精度がかなり改善されることを意味する。また、トルク係数を事前に正しく決めることが実際には難しいことも本方法が有効な手段となり得ることを示す。

図6に実験E2の結果を示す。横軸 X が目標として与えた軸力、縦軸 Y がそれに対応して得られた軸力に当たる。図中には、直線回帰分析⁹⁾の結果も表す。

回帰直線の式は、

$$Y = 1.014X + 1.66 \text{ (kN)}$$

であり、 X の係数 β の95%信頼限界は、 $0.86 \leq \beta \leq 1.17$ となる。従って、偏りはあるとしても全域ではほぼ一定(約8.5%)となり、平均的には目標直線 $Y = X$ に十分に平行な応答を示している。平均値 $E(Y)$ の信頼区間を考慮に入れても、1 kN程度 of 目標値の

Table 3 Calculated values and measured ones of compliance

No.	Calculated			Measured (resultant) δ
	Part to be fastened	Bolt-nut	Resultant δ	
I	0.41 ①	2.56	2.97	4.70
II	0.37 ②	3.44	3.81	5.10
III	0.41 ③	3.88	4.29	6.20

①, ②, ③: No. of the cylindrical part (Fig. 3)

違いにかなりよく応答しているものと思われる。

実験E1, E2の結果から、コンプライアンス δ さえ確実に与えることができれば、ねじ面及び座面の摩擦状態に煩わされることなく、従来のトルク法より精度よく軸力管理できる可能性が示された。

しかしながら、本方法は図1に示す⑧の形状に影響され、それが単調な増加形状ではなく、特に増減を繰り返すような場合には不適当となることが予想される。従って、例えば座金、座面の材質、ボルトの表面处理など締付過程における変動要因が上述⑧の形状及び軸力管理精度に及ぼす影響についても実験を重ね、本方法の適用範囲にも研究を進める必要がある。

5. コンプライアンスの設定

ボルト・ナットを含めた締結体の軸方向のコンプライアンス δ の値が不適切であると、得られる軸力にはそれによる偏り誤差が加わる。ここでは、 δ の設定方法について考察する。

δ を計算によって与えることができれば好都合である⁴⁾。そのため、まずボルト・ナット及び被締付物についてのコンプライアンス計算法¹⁰⁾により δ を求め、次に本研究の締付装置により実際に求めた予備実験値(表2参照)と比較検討する。

ボルト・ナット系に対しては、各部を円筒要素に分割してそれらを直列接続してコンプライアンス δ_s を求め、被締付物に対しては、等価円筒の考え方によりコンプライアンス δ_F を算出して両者を加える。すなわち、

$$\delta = \delta_s + \delta_F \quad (3)$$

ここで、 $\delta_s = \delta_K + \delta_1 + \delta_2 + \delta_{GM}$ であり、 δ_K はボルト頭部(等価長さ $0.4d$ 、等価断面積 $\pi d^2/4$)、 δ_1 は軸部、 δ_2 は遊びねじ部(等価断面積: 谷の断面積)、 δ_{GM} ははめ合いねじ山部(等価長さ $0.5d$ 、等価断面積: 谷の断面積)及びナット本体部(等価長さ $0.4d$ 、等価断面積 $\pi d^2/4$)のコンプライアンスを示す。また、 δ_F については L (図3参照)を長さとし、等価圧縮体に基づく等価断面積の考え方¹⁰⁾を用いて求められる。

表3に δ に関する式(3)に基づく計算値と実測値の比較結果を示す。計算値は小さすぎ、両者の間にはすべての場合にかかなり大きな違いが認められる。この結果からは、 δ に計算値を用いると最終軸力が目標値よりかなり下がり、大きな偏り誤差が現れることが予想される。実際に δ を精密に計算することは難しい。従って、現状では δ には実測値を採用する方が適切であると判断される。

また、締付装置自体にも検出方法等に個々の特性があるので、それ自体について δ に関する予備実験を準備し、対応した δ の値を利用するのが確実に実際のであると考えられる。

6. 結 言

本研究の結果を以下にまとめる。

- (1) ねじ締付体の軸方向コンプライアンスを基本値として締付過程で目標の締付けトルクを予測する弾性域の軸力管理法⁴⁾について実用化を念頭においた実験的研究を行った。
- (2) 締付回転の動力は速度制御を施したDCモータにより与えられ、マイコンにより管理される締付装置を製作し、所要の機能を与えた。
- (3) コンプライアンスや潤滑油等を条件にした軸力管理実験と段階的に変化させた目標軸力に対する応答性実験を行い、本方法による精度を検討した。その結果、摩擦状態に煩わされることなく、

従来のトルク法よりかなりよい精度で軸力管理できる見通しが得られた。

- (4) 本方法の基本値となるコンプライアンスの設定について検討した。それを計算で正確に見積ることは難しく、締付装置そのものによる予備実験値を用いることが現状では実際の確実である。

本研究に対し、卒研究生の鈴木徹君(現ダイキン)からは献身的な協力をいただき、堤信一、小林仁技官には装置製作に協力いただいた。ここに記して感謝する。

参 考 文 献

- 1) 丸山一男, 賀勢晋司, 沢 俊行訳: VDI2230 Blatt 1 ('86) 高強度ねじ締結の体系的計算法, 日本ねじ研究協会, (1989) 48.
- 2) 日本ねじ研究協会: ねじ締結ガイドブック (締結編), 日本ねじ研究協会, (1985) 15.
- 3) G. H. Junker (松下〇〇訳): ねじの弾性限界締付け, 機械設計, 23, 11 (1981) 66.
- 4) 賀勢晋司ほか: 締付け中の予測によるねじの軸力管理 (トルク法のための一試行), 日本機械学会論文集 (C), 55, 510 (1989) 407.
- 5) 例えば, 日本ねじ研究協会: 昭53年度工業技術院委託研究報告書 (II), (1982) 87.
- 6) 5)に同じ, p. 118.
- 7) 5)に同じ, p. 51.
- 8) 例えば, 吉本 勇: 確率統計工学, 共立出版, (1976) 69.
- 9) 吉本 勇: 工学統計解析, 養賢堂, (1981) 82.
- 10) 1)に同じ, p. 7.

編 集 後 記

「蚊など微生物に知能があれば、非常に高度な機能を持ったマイクロマシンを作れるだろう」とは、大先達林教授の慨嘆として伝えられるところ。マイクロマシンを作ることにはかほどに難しいということに違いない。

蚊には知能が無いという世の定説に背いて仮に高度なそれがあったとしよう。

彼らがどんな世界観を持つかは知る由もないが、中には彼らから見たマイクロマシンを欲しいと思うものがないものでもない。ところがこれができるかとしてもそれはもう量子の領域。その機械は彼らの意志に反して不確定性原理に従うのみである。そこで彼らがせめて自分たちの手足の大きさほどの機械を作って人類との友好関係に役立てようと考えてくれれば幸いというわけである。

しかし彼らの日常はほとんど均熱の世界といえる。この大きさでは断熱は絶望的に難しく、金属を精錬しようとするればその設備は彼らにとって途方もなく巨大なものとな

る。もちろん電気化学的に原子を1個ずつ並べる方法を思い付くに違いないが、彼らのスケールでは到るところでトンネル電流が流れ、わずかに数ボルトの電圧でも致命的な高電界を発生することを考えれば、これまた彼らの扱いやすい大きさに設備することは難しい。つまり、残念ながら彼らは冶金技術を持ち得ないわけで、ブシカはあったとしても機械文明を築くことは叶わない。

ヒトの世界では、通産省の「マイクロロボット」大プロジェクトが新聞に発表されるなど、最近とみにマイクロマシンに対する関心が高まっているようである。医療、バイオをはじめ実に多様なニーズが提示され、シーズも生まれつつある。優れたマイクロマシンを作るための加工、組立技術の開発が課題として採り上げられるであろう。

マイクロマシンの組立には確かにかなりぬきぬきマイクロなマシンがよく働いてくれそうな予感があるが、部品の加工にはやはりある程度大がかりな機械を操らなければならぬまい。それにしても人類のサイズはなんとほどよくできていることか。おそらく神に感謝すべきことなのだろう。

(山田昭政)