

トルクと圧縮力の同時負荷によるボルト締付力の新しい検出法*

森 和也^{*1}, 村上敬宜^{*2}, 橋村真治^{*1}
今井良一^{*1}, 松井 悟^{*1}A New Measurement Method of Bolt Tightening Forces
Based on Simultaneous Loading of Torque and Compressive ForceKazuya MORI, Yuditaka MURAKAMI, Shinji HASHIMURA,
Ryoichi IMAI and Satoru MATSUI

A new measurement method of bolt tightening forces by simultaneous loading of torque and compressive force to a bolt has been developed. By simultaneous application of torque and compressive force to a bolt, the friction coefficients in threads and bearing surfaces are accurately detected separately in the process of tightening. Thus, the present method can control the tightening force of bolts within the error of $\pm 10\%$ for wide tightening forces under oil-free or lubricated conditions. The working efficiency of the present method is much better than that of the angle control method or the torque gradient control method because it is not necessary to measure the tightening angle and the friction coefficients in advance.

Key Words: Bolt, Tightening Force, Tribology, Friction, Fixing Element, Torque Control Method

1. 緒 言

ボルトは、取扱いが簡単であることから橋りょうからマイクロ部品に至るまで部材の締結に広く利用されている。ボルトの締付力は、一般に適正な値に管理することが必要である。締付力が適正でなければ、使用中にゆるみが生じる。使用中のボルトのゆるみは、ボルトの疲労破壊や締付部品の振動の原因になることはよく知られている。

現在 JIS で定められているボルトの締付力の管理方法⁽¹⁾には、締付トルクを指標として管理する「トルク法」、締付回転角によって管理する「回転角法」および締付回転角に対する締付トルクのこう配を基に管理する「トルクこう配法」がある。これらのなかで「トルク法」は、特殊な締付機具を必要としない作業性に優れた方法であるので、最も一般的に使われている。しかし、「トルク法」では、ボルト 1 本 1 本の摩擦特性の違いを考慮に入れていないので、他の二つの方法に比べ締付力がばらつく。すでに締付けられたボルト

の締付力を測定する方法としては、超音波を用いる方法⁽²⁾⁻⁽⁴⁾が提案されている。この方法でボルトの締付力を精度よく測定できるためにはボルトの寸法がある程度長くなければならない。また、作業性も必ずしもよくないので、多数のボルトを短時間で締付けなければならない自動車関連産業や建築構造物への応用は困難である。

本研究では、「トルク法」の優れた作業性をそのままに、問題となった摩擦特性を 1 本 1 本のボルトごとに簡便に検出する「新トルク法」を開発した。この方法は、ボルトに圧縮荷重をかけながら締付けることによって、圧縮荷重と締付トルクとの関係から摩擦特性を評価し、その摩擦特性に基づいて締付力を管理するものである。この方法では、締付ける過程で摩擦特性を測定するので締付効率を損なわない。さらに、摩擦特性を個々のボルトについて測定するので、締付力の信頼性が従来のトルク法に比べ高い。この新トルク法と従来のトルク法を用いて実際にボルトの締付け実験を行い、両者の比較により本方法の有効性を示した。

2. 理 論

2.1 締付トルク T と締付力 F との関係 図 1
に、ボルトによる締付けの概略図を示す。ボルトをト

* 原稿受付 1997 年 3 月 14 日。

*¹ 正員, 久留米工業高等専門学校 (☎ 830-8555 久留米市小森野町 1232)。*² 正員, 九州大学工学部 (☎ 812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

トルク T で締付けるとき、 T はおねじとめねじ間(以下、ねじ面間と呼ぶ)に生じる摩擦力による摩擦トルク T_s 、ボルト頭と座面間(以下、座面間と呼ぶ)に生じる摩擦力による摩擦トルク T_w および締付力を生じさせるトルク T_f に分けて考えることができる。すなわち、

$$T = T_s + T_w + T_f \dots\dots\dots (1)$$

このとき、ボルトによる締付力を F とするとねじ面間における摩擦トルク T_s は次式のように表すことができる⁽⁵⁾。

$$T_s = \xi \cdot F \dots\dots\dots (2)$$

$$\xi = \mu_s \cdot (d_2/2) \sec \alpha' \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 μ_s はねじ面間の摩擦係数、 d_2 はねじの有効直径、 α' はねじ山の山直角断面におけるフランク角である(図2参照)。

座面間の摩擦トルク T_w は、

$$T_w = \eta \cdot F \dots\dots\dots (4)$$

$$\eta = \mu_w \cdot D_w/2 \dots\dots\dots (5)$$

となる。ここで、 μ_w は座面間の摩擦係数、 D_w は座面間における摩擦トルクの等価直径である。

D_w は次式を用いて求めることができる⁽¹⁾。

$$D_w = \frac{2}{3} \times \frac{D_o^3 - D_i^3}{D_o^2 - D_i^2} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 D_o は接触する座面の外径であり、 D_i は接触する座面の内径である。

また、締付力を生じさせるトルク T_f は、

$$T_f = \zeta \cdot F \dots\dots\dots (7)$$

$$\zeta = P/2\pi \dots\dots\dots (8)$$

と表される。ここで、 P はねじのピッチである。

式(2)と(4)および(7)を式(1)に代入して、締付トルク T と締付力 F との関係が次式のように求められる。

$$T = (\xi + \eta + \zeta) \cdot F \dots\dots\dots (9)$$

2.2 従来のトルク法 トルク法における締付力 F の評価は、式(3)と式(5)における摩擦係数 μ_s と μ_w をあらかじめ測定し、締付トルク T を指標として行う。すなわち、トルク法ではそれぞれのボルトの摩擦係数 μ_s と μ_w は一定であるとの仮定に立っている。

したがってこの方法によってボルトの締付力の管理を行う場合には、目標の締付力が決まれば同寸法のボルトと被締結部材に加える締付トルクはすべて一定となる。しかし、 μ_s と μ_w の値は個々の場合において異なる。仮定した $(\mu_s + \mu_w)$ の値と実際の $(\mu_s + \mu_w)$ の値との差が実際に生じる締付力の差をもたらす。摩擦係数の仮定した値と実際の値との差がわずかであっても締付力の大きい誤差をもたらすことに注意しなければならない。なぜなら、全トルク T のうち摩擦仕事に消費されるトルク $(T_s + T_w)$ の占める割合が90%程度に達するからである。実際に現在ごく一般的に用いられているトルク法によるボルト締付力管理では、締付力の信頼性に問題が生じているのである。

2.3 新トルク法 本論文で提案する新しいトルク法は、従来、それぞれのボルトにおいて一定と仮定した摩擦特性を締付けの過程で検出することにより所定の締付トルクを見い出す方法である。

図3に示すように、ボルトに圧縮荷重 Q をかけながら締込むと、まず、ねじ面間のみが接触した状態で

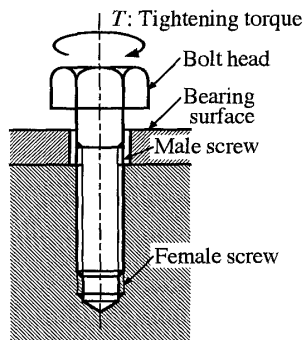


Fig. 1 Schematic diagram of bolt tightening

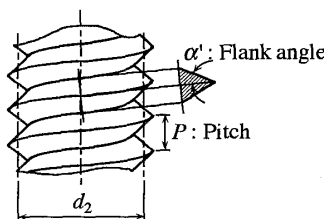


Fig. 2 Flank angle

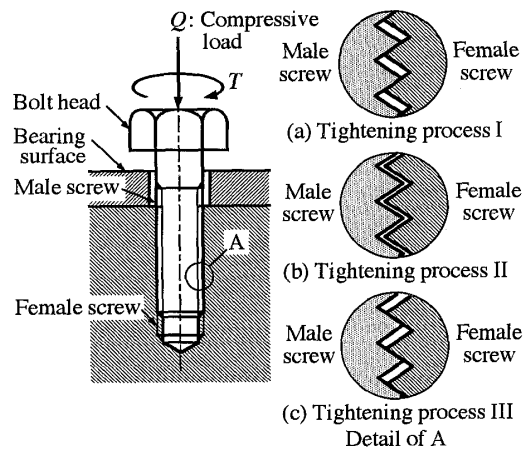


Fig. 3 Relationship between male and female screws in tightening process: (a) before contact of bolt head with bearing surface; (b) just after contact; (c) after tightening

締込まれる [図 3(a)]. 次に, ボルト頭と座面が接触した直後, ねじのバックラッシュのために, おねじとめねじは非接触状態となりボルト頭と座面のみが接触した状態となる [図 3(b)]. その後, ボルト頭と座面, おねじとめねじが摩擦しながら締込まれる [図 3(c)]. 本研究では, このボルトが締込まれていく過程の個々の接触状態を利用してねじ面間と座面間の摩擦特性 [式(3)の ξ および式(5)の η] を検出する.

図 3(a) (Tightening process I) の状態において, ボルトの締付けに要するトルクを T_1 とする. また, 圧縮荷重 Q 自体もボルトを締ませる方向にトルク T_q を生じさせる. 結局, ボルトに作用する締付トルクは, T_1 と T_q との和 ($T_1 + T_q$) である. この ($T_1 + T_q$) はねじ面間のみ摩擦によって受け持たれる. ここで T_q は, 式(7)と同様に,

$$T_q = \zeta \cdot Q \quad \dots\dots\dots (10)$$

と表される.

このときの ($T_1 + T_q$) および Q は, 式(2)の T_s および F にそれぞれ対応する. よって,

$$\xi = \frac{T_s}{F} = \frac{T_1 + T_q}{Q} = \frac{T_1}{Q} + \zeta \quad \dots\dots\dots (11)$$

次に, 図 3(b) (Tightening process II) の状態での締付トルクを T_2 とすれば, T_2 は座面間の摩擦によって受けもたれるので, T_2 および Q は式(4)の T_w および F にそれぞれ対応する. よって,

$$\eta = \frac{T_w}{F} = \frac{T_2}{Q} \quad \dots\dots\dots (12)$$

最後の図 3(c) (Tightening process III) の締付状態では, 座面間に作用する力が ($F + Q$) となることから, 式(9)は,

$$T = (\xi + \eta + \zeta) \cdot F + \eta \cdot Q \quad \dots\dots\dots (13)$$

となる.

結局, ξ は式(11), η は式(12), ζ は式(8)で決定され, Q と T は測定される量であるから, 締付力 F を決定することができる. すなわち,

$$F = \frac{T - \eta \cdot Q}{(\xi + \eta + \zeta)} \quad \dots\dots\dots (14)$$

3. 実 験

3.1 実験装置 図 4 に, 実験装置の概略を示す. リニアウエイによって上下に自由に移動できる台の上にハーモニックギヤードステッピングモータを固定し, ボルトの締付けを行う. ハーモニックギヤの出力軸とボルトを締込む六角レンチとの間にトルク変換器を接続した. ボルトの締付力は, めねじに固定したロードセルで測定した. ロードセルにねじりモーメント

が作用しないように, めねじの軸直角方向に丸棒を通し, めねじの回転を防いだ.

ステッピングモータの回転は, パーソナルコンピュータを用いて制御した. トルク変換器とロードセルのひずみ出力は, 動ひずみ測定器によって電気信号に変換し, A/D 変換ボードを用いてパーソナルコンピュータに取込んだ.

試験に用いたボルトは, 市販の M12×1.75, $l=70$ mm, 部品等級 A の六角穴付ボルトで, 材質は SCM 435 である. ボルトのピッチの精度を測定したところ, 単一ピッチとしては 1% 程度の誤差が認められたが, 累積ピッチとしてはほとんど誤差は認められなかった. めねじのピッチ精度を決定するタップは, 等級 II のものを用いた. 座面およびめねじの材質は S 55 C を用いた.

3.2 実験方法 「ねじ面間・座面間ともに無潤滑」と「ねじ面間・座面間ともに潤滑剤で潤滑」の 2 種類の潤滑状態に対してボルトの締付試験を行った. ここで, 無潤滑とは, アセトンを用いてしゅう動面の油分を完全に取除いた状態を意味する. また, 潤滑剤による潤滑は, 耐圧耐摩耗性に優れた二硫化モリブデン配合リチウム石鹼基グリースをねじ面および座面に塗込んだ状態である.

ボルトの圧縮荷重は, ステッピングモータ等の自重をそのまま用いた $Q=270$ N とトルク変換器の許容

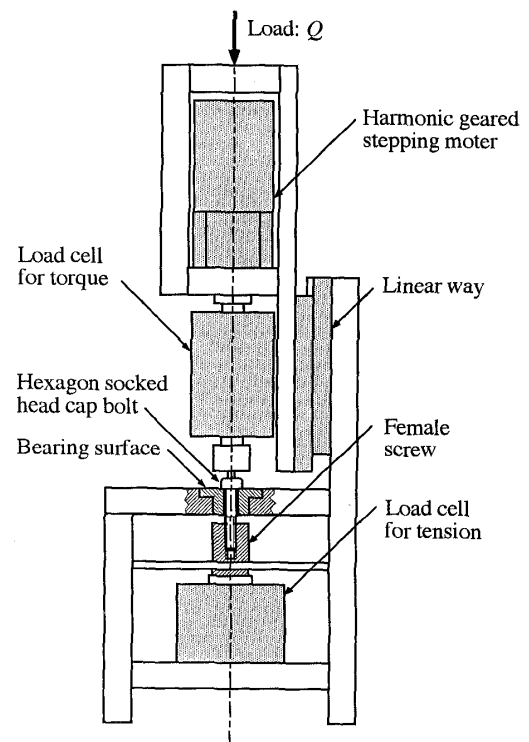


Fig. 4 Experimental apparatus

圧縮荷重と等しい $Q=490\text{ N}$ の 2 種類とした。締込みの回転速度は約 0.3 r.p.m. とした。また、各実験における接触面の状況を等しくするため、各実験の前に # 600 のサンドペーパーで座面の表面荒さをほぼ等しくし、実験ごとに新しいボルトを用いた。

3.3 実験結果 図 5 に、ねじ面間・座面間ともに無潤滑で、 $Q=490\text{ N}$ の場合の締付回転角 θ に対する締付トルク T と締付力 F の一例を示す。図 5 中の Process I が図 3(a) の状態に相当し、Process II および Process III がそれぞれ図 3(b) および図 3(c) に対応している。

本実験で用いたボルトのピッチは $P=1.75\text{ mm}$ であるから、式 (8) より、

$$\xi = \frac{P}{2\pi} = \frac{1.75 \times 10^{-3}\text{ m}}{2\pi} = 2.79 \times 10^{-4}\text{ m} \dots\dots (15)$$

となる。

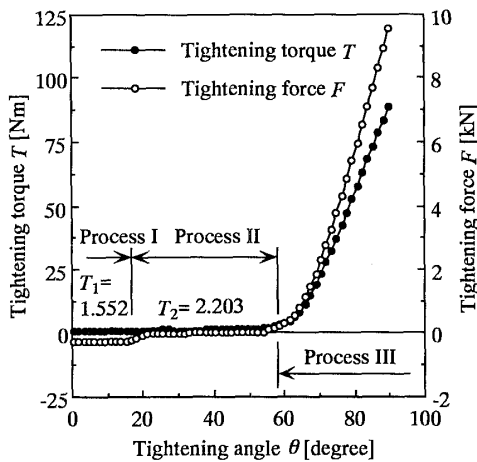


Fig. 5 Variation of tightening torque T and tightening force F with tightening angle θ

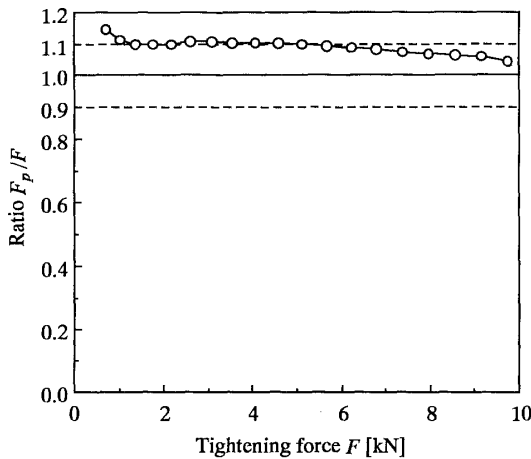


Fig. 6 Ratio of predicted tightening force F_p to experimental tightening force F

Process I における締付トルクは $T_1=1.552\text{ Nm}$, Process II における締付トルクは $T_2=2.203\text{ Nm}$ であった。ボルトの圧縮荷重は $Q=490\text{ N}$ であるから、式 (11), (12) より、

$$\begin{aligned} \xi &= \frac{T_1}{Q} + \zeta = \frac{1.552\text{ Nm}}{490\text{ N}} + 2.79 \times 10^{-4}\text{ m} \\ &= 3.45 \times 10^{-3}\text{ m} \dots\dots (16) \end{aligned}$$

$$\eta = \frac{T_2}{Q} = \frac{2.203\text{ Nm}}{490\text{ N}} = 4.50 \times 10^{-3}\text{ m} \dots\dots (17)$$

を得る。

そこで、このボルトの締付力の予測値 F_p は、式 (14) より次のように求めることができる。

$$F_p = \frac{T - \eta \cdot Q}{(\xi + \eta + \zeta)} = \frac{T - 2.203}{8.22 \times 10^{-3}}\text{ N} \dots\dots (18)$$

図 6 は、Process III における締付力の予測値 F_p と実験値 F との比を締付力 F に対してプロットしたものである。予測値 F_p と実験値 F との差は、広い範囲の締付力に対して、ほぼ 10% 未満であることがわかる。 F_p と F との差は、 T_1 と T_2 の測定誤差と摩擦係数がしゅう動面の垂直荷重に対して変化するためである。

次に、締付力の目標値を $F=9.81\text{ kN}$ に設定し、締付トルク T を制御して得られた締付力の実験結果を表 1 に示す。それぞれの潤滑状態・圧縮荷重の組合せに対して実験を 5 回行った。表 1 における T および F は、新トルク法と名付けた本法によって求められた締付トルクとそのトルクに基づいて得られた締付力の実験値である。

Table 1 Tightening torque T obtained by the present method and experimental results of tightening force F

	Q [N]	No.	T_1	T_2	T	F	Error [%]
			[Nm]	[Nm]	[Nm]	[kN]	
Oil-free condition	270	1	0.981	1.118	82.91	8.78	-10.5
		2	0.640	0.780	57.88	9.97	1.7
		3	0.830	1.437	89.32	10.47	6.7
		4	0.823	1.087	75.99	8.17	-16.7
		5	0.873	1.672	99.65	10.77	9.8
	490	1	1.552	2.203	82.78	9.28	-5.3
		2	1.079	2.594	81.51	10.52	7.3
		3	1.232	2.497	82.56	10.01	2.1
		4	1.176	2.220	75.61	9.01	-8.2
		5	1.395	2.465	85.14	9.74	-0.7
Lubricated condition	270	1	0.262	0.309	26.56	8.57	-12.6
		2	0.255	0.408	30.01	10.15	3.5
		3	0.229	0.300	25.02	9.91	1.1
		4	0.207	0.348	26.00	9.19	-6.3
		5	0.260	0.344	27.79	10.53	7.4
	490	1	0.373	0.603	25.59	9.77	-0.4
		2	0.390	0.517	24.13	9.12	-7.0
		3	0.292	0.805	28.20	10.36	5.7
		4	0.275	0.772	27.17	9.55	-2.7
		5	0.381	0.523	24.08	9.53	-2.8

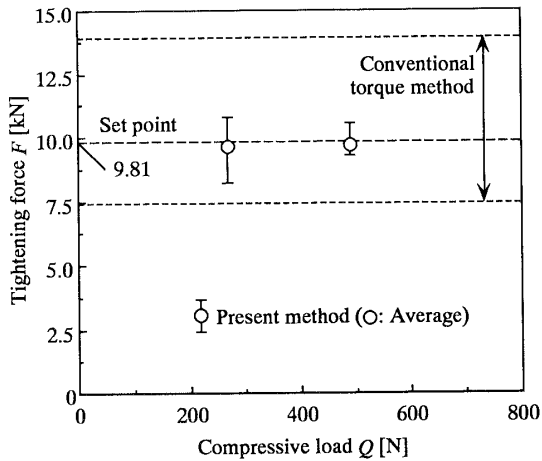


Fig. 7 Clamping-force-control test by the present method and the torque control method under oil-free condition

図7に、無潤滑における圧縮荷重 Q に対する締付力 F の幅を実線の長さで表し、それらの平均値を○印で表している。

図8は、潤滑剤で潤滑した場合の圧縮荷重 Q に対する締付力 F の幅を示している。潤滑剤を用いた場合は、摩擦係数の変動幅が小さくなるので、締付力の誤差も小さくなる。

図7および図8より、圧縮荷重が大きいかほど締付力の幅が小さくなっていることがわかる。これは、圧縮荷重の大きい方が T_1 と T_2 の測定精度が高くなることと、摩擦係数がしゅう動面の垂直荷重によって変化するので、圧縮荷重が締付荷重に近いほうが摩擦係数の変化が小さくなるためである。

無潤滑および潤滑剤による潤滑に対するそれぞれ10回の実験結果から、無潤滑と潤滑剤による潤滑に対するねじ面間および座面間の摩擦係数の平均値は、式(3)および(5)を用いて次のように求められた。

$$\mu_s = 0.499, \mu_w = 0.585 \text{ (Oil-free condition)} \quad \dots\dots\dots (19)$$

$$\mu_s = 0.172, \mu_w = 0.161 \text{ (Lubricated condition)} \quad \dots\dots\dots (20)$$

式(19)および(20)の摩擦係数の値に基づいて、従来のトルク法を用いて締付力が $F=9.81$ kN となるように締付試験を行った結果を図7および8中の点線で示している。実験はそれぞれの潤滑条件に対して5回行った。図7および8中の上の点線はその最大値、下の点線はその最小値を表している。通常のトルク法では、摩擦係数を実際の締付け状態とは異なる方法で測定するので、締付力の誤差はさらに大きくなる。

図7および8より、従来のトルク法にくらべ、本研

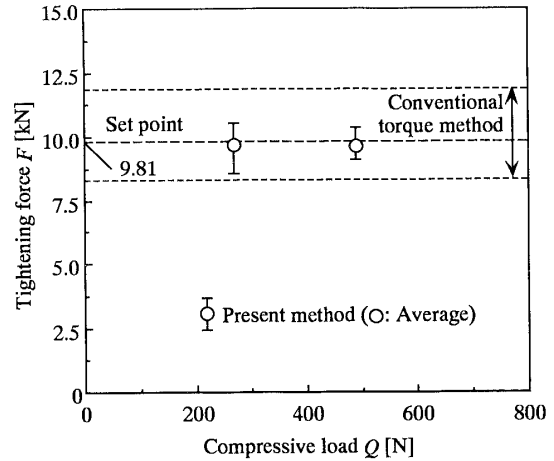


Fig. 8 Clamping-force-control test by the present method and the torque control method under lubricated condition

究で開発した「新トルク法」の信頼性が、潤滑状態にかかわらず優れていることがわかる。

4. 考 察

ここでは、実験結果に基づいてボルトに加える最適な圧縮荷重について検討する。

ボルトに加える圧縮荷重の大きさは、締付力の精度に影響を及ぼす。したがって、圧縮荷重は目標の締付力の精度の許容範囲から決定すればよい。圧縮荷重の大きさが締付力の精度に影響を及ぼす原因は次の二つである。

- (1) 圧縮荷重の大きさによって摩擦係数測定時の締付トルク T_1 および T_2 の測定精度が異なる。
- (2) 圧縮荷重の大きさによってしゅう動面の垂直荷重が変化し、その垂直荷重の大きさによって摩擦係数の値が変動する。

そこで、まず上記(1)の原因について考察する。 T_1 と T_2 の大きさは、ともに圧縮荷重 Q の大きさに比例する。さらに、 T_1 はボルトの有効直径 d_2 に比例し、 T_2 は座面間の摩擦の等価直径 D_w に比例する。 T_1 と T_2 の大きさと測定精度とは比例するので、 T_1 と T_2 の測定精度を一定値以上に保つためには、 d_2 と D_w をボルトの呼び径 d で近似すれば、次式が Q を決定するための一つの条件となる。

$$Q \cdot d \geq C_1 \text{ (Constant)} \quad \dots\dots\dots (21)$$

次に、上記(2)の原因について考察する。しゅう動面の垂直荷重の変化に対する摩擦係数の変化は、おねじとめねじの材料の組合せ、ボルト頭と座面の材料の組合せおよび加工精度(表面性状)によって異なるので、単純には予測することはできない。しかし、締付

力に応じて加える圧縮荷重の大きさを決定すれば、摩擦係数の変化による締付力の誤差を一定値以下にすることができると考えられる。このように考えると、ボルトに加える圧縮荷重 Q を決定するもう一つの条件として、最も簡単に Q を締付力の大きさ F に比例させることが考えられる。すなわち、

$$Q/F \geq C_2 (\text{Constant}) \dots\dots\dots (22)$$

この大まかな仮定は、締付力の変化に対する摩擦係数の変化がそれほど大きなものではないことをよりどころとしている。図6において、締付力の予測値 F_p と締付力の実験値 F との比 F_p/F は、 $F=5 \text{ kN}$ を越えるとわずかな変化はあるが非線形に変化する。このわずかな変化が、摩擦係数の変化によるものである。なぜならば、 T_1 と T_2 の測定誤差は、摩擦係数の推定値に誤差を生じさせるものであるが、 F に対する摩擦係数の変化を引き起こすものではなく、 F_p/F の非線形な変化を生じさせることはないからである。

本実験では、締付力が $F \leq 9.81 \text{ kN}$ の範囲内において、 F_p/F の変化はいずれも5%未満であった。そこで、締付力に比例して圧縮荷重を決定してもそれほど大きな誤差は生じないと考えられる。

結局、式(21)と式(22)を同時に満足する圧縮荷重をボルトに作用させて摩擦係数を測定すれば、締付力の誤差がある一定値以下になる。

次に、実験結果に基づいて、式(21)の C_1 と式(22)の C_2 の具体的な値を示す。図7および図8から、締付力が $F=9.81 \text{ kN}$ の場合、圧縮荷重を $Q=490 \text{ N}$ 以上にすれば、締付力の誤差は $\pm 10\%$ 以内になることがわかった。そこでこのときの圧縮荷重を基に、締付力の誤差が $\pm 10\%$ 以内になる C_1 と C_2 を求めてみる。

式(21)より、

$$C_1 = Q \cdot d = 490 \text{ N} \cdot 12 \times 10^{-3} \text{ m} \cong 5.9 \text{ Nm} \dots\dots\dots (23)$$

式(22)より、

$$C_2 = Q/F = 490 \text{ N} / 9810 \text{ N} \cong 0.05 \dots\dots\dots (24)$$

ところで、「新トルク法」は、ねじ面間への異物のかみ込みを検知することも可能である。締付けの実際のプロセスでは、ボルトの圧縮荷重はある程度ボルトが締付けられた後から加えることになる。正常な締付け状態では、圧縮荷重を加える前の締付トルクはほとんどなく、圧縮荷重を加えた状態での締付トルクは圧縮荷重に比例する。そこで、圧縮荷重を加える前後の締付トルクを比較すると、正常な締付け状態であるかを判別することが可能で、異物等のかみ込みを検知することができる。

5. 結 言

(1) ボルトに圧縮荷重をかけながら締付けることによって、座面間およびねじ面間の摩擦特性を検出し、締付力を高い信頼性で管理することができる「新トルク法」を開発した。本方法による締付力の決定精度は締付力の広い範囲で $\pm 10\%$ 以下である。

(2) 本方法は、あらかじめ摩擦係数を測定する必要がない上に、締付回転角の計測も必要としないので、回転角法やトルクこう配法に比べ簡便で作業性に優れている。

(3) 本方法では、ねじ面間への異物のかみ込みを圧縮荷重をかける前と後の締付トルクの変化から検知することも可能である。

文 献

- (1) 日本規格協会, ねじの締付け通則, JIS B1083(1990).
- (2) Smith, J. F. and Greiner, J. D., *J. Met.*, **32-7**(1980), 34-36.
- (3) Sorel, M., Aubert, J. and Brand, A., *Rev. Acoust.*, **16-66**(1983), 183-190.
- (4) 滝下利男・鈴木嘉昭, 配管技術, **31-8**(1989), 91-95.
- (5) 例えば, 木内石, 機械設計便覧, (1976), 169, 日刊工業新聞社.