



# トルク法によるボルト締付けについて : 軸力とトルクに対する摩擦係数の影響

福岡, 俊道

---

(Citation)

神戸商船大学紀要. 第二類, 商船・理工学篇, 40:115-119

(Issue Date)

1992-07

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81004297>



トルク法によるボルト締付けについて  
(軸力とトルクに対する摩擦係数の影響)  
Tightening Process of Bolts with a Torque Method  
(Effects of Friction on Axial Force and Torque)

福岡俊道  
Toshimichi Fukuoka

(平成4年3月15日受理)

Abstract

The tightening process of bolts with a torque method is experimentally studied. Friction coefficients on both pressure flank of screw thread and the nut bearing surface are estimated by measuring the total torque, axial force and torque applied to nut. Variations of friction coefficients due to an alternation of tightening and loosening are also examined. It is shown that the size of grip length has some influences on the reduction rates in torque and axial force. A torque factor is given as a function of friction coefficients.

(Received March 15, 1992)

1 はじめに

ボルトにより構造物を締結する場合、非常に高い精度で軸力を管理する必要がある部分では、油圧テンショナが広く使用されている<sup>(1)</sup>。しかしながらコスト上に問題等から、一般には呼び径の大きなものを除いてはトルクをかけて締付けることが多い。その際、与えたトルクと発生する軸力の間にかなりのばらつきがあるのが通例である<sup>(2)</sup>、<sup>(3)</sup>。このばらつきは、ねじ面、ナット座面、ボルト頭部座面の摩擦係数の値が、接触状態および潤滑方法により大きく変化するためである。摩擦係数のばらつきは、潤滑の問題を除いて考えると2つの原因に分類できると考えられる。すなわち、初期締付け時における接触面の状態のばらつきと、締付け、開放の繰り返しに伴う接触状態の変化である。またトルク法により締付けた場合、トルクレンチをはなすと戻り回転によって軸力がある程度低下する。増し締めはこれに対応する手段であり、その程度は作業者の勘によっていることが多い。そこで本研究では、トルクレンチと連続的なひずみ測定が可能なデータロガーを用いて、締付け開放に伴う接触面摩擦係数の変化と軸力の関係、締付け完了後の軸力、トルクの変化および増し締めの効果について、従来ほとんど検討されていないグリップ長さの影響に重点をおいて検討する。

また、接触面の摩擦係数の値を考慮したトルク係数を提案する。

2 軸力、トルクの測定と接触面摩擦係数

2.1 軸力とトルクの測定方法

本研究における測定方法は、ナットにトルクを与えるために静ねじり試験機のかわりにトルクレンチを用いることを除けば、基本的には池田らの研究<sup>(3)</sup>と同じである。締付け時に与えるトルクはトルクレンチにより容易に測定でき、これを全トルク $T_t$ と呼称する。 $T_t$ はねじ面、ナット座面で消費されるトルク $T_1$ と $T_2$ の和である。 $T_1$ をひずみゲージにより求めると、 $T_2$ は $T_t$ と $T_1$ の差として求められる。ボルトに発生する軸力 $F_b$ は $T_1$ と同様ひずみゲージにより求める。ここで $F_b$ および $T_1$ は、それぞれ図1に示した対辺2アクティブゲージ法、4アクティブゲージ法で求める。

2.2 ねじ面とナット座面の摩擦係数の算出

前節で述べたように、ボルトに発生する軸力 $F_b$ 、全トルク $T_t$ 、ねじ面で消費されるトルク $T_1$ が測定されると、ねじ面およびナット座面における摩擦係数 $\mu_1$ 、 $\mu_2$ は以下のようにして求められる<sup>(4)</sup>。 $d_2$ を有効径、 $\rho'$ をねじ面の摩擦角、 $\beta$ をリード角とすると、 $T_1$ は次式で表される。

$$T_1 = \frac{d_2 F_b}{2} \tan(\rho' + \beta) \quad (1)$$

式(1)から  $\rho'$  の値が得られるので、 $\alpha$ 、 $\alpha'$  をそれぞれねじ山半角、ねじ山の山直角断面における半角とすると、以下に示す関係からねじ面における摩擦係数  $\mu_1$  が求められる。

$$\tan \alpha' = \tan \alpha \cdot \cos \beta, \quad \tan \rho' = \frac{\mu_1}{\cos \alpha'} \quad (2)$$

また、ナット座面で消費されるトルク  $T_2$  は次式で与えられる。

$$T_2 = \frac{1}{2} F_b \mu_2 d_n \quad (3)$$

ここで  $d_n$  はナット座面における摩擦トルクの等価直径で、近似的に呼び径  $d$  の1.3倍として差しつかえないようである。したがって式(3) からナット座面における摩擦係数  $\mu_2$  が求められる。

### 3 実験方法

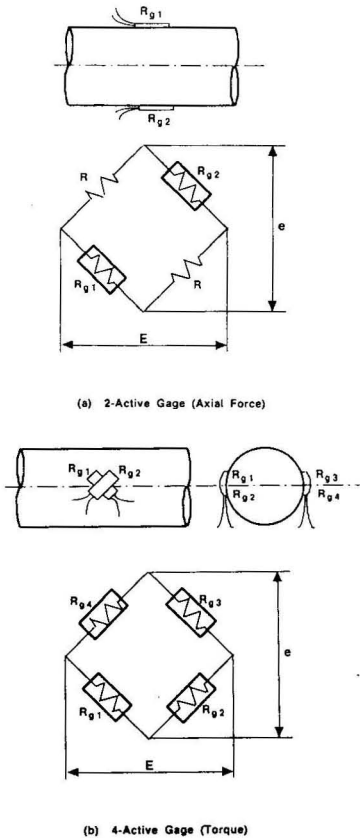


Fig.1 Measurement of axial force and torque

実験に使用したボルトはM16である。グリップ長さの影響を検討するために、呼び長さが80,99,123,148mmと4種類のボルト(No.1~No.4)を用いる。被締結体は、図2に示したように2つ割の中空円筒である。図中  $L_f$  がグリップ長さとなる。ひずみゲージはボルト円筒部の中央付近に貼るので、その付近でわずかながらボルト穴を大きくしている。また上側の円筒には、ひずみゲージのリード線を取り出すためにスリットを設けている。円筒の外径  $d_f$  は60mmである。被締結体はボルトに対応して4種類あり、その寸法を表1にまとめている。トルクはナット側に、0から88.2N・mまでトルクレンチによって与え、ねじ面、ナット座面はともに乾燥状態とする。なお測定は10段階、すなわち8.82N・mきざみのトルク変化に対して実施する。ひずみの測定に使用したデータロガーは、小型のコンピュータが組み込まれており、10チャンネルを有している。本実験では測定対象がボルトに発生する軸力  $F_b$  とねじ面で消費されるトルク  $T_1$  のみであるので、2チャンネルを使用する。また、1秒あたり1チャンネルをスキャンできるので、その機能を用いて締付け完了後の軸力、トルクの時間変化が連続的に測定できる。

### 4 実験結果

#### 4.1 ボルト締付け時の挙動

トルクと軸力の関係の一例を図3(a),(b)に示し

Table 1 Specifications of Cylinders (mm)

|       | No.1 | No.2 | No.3 | No.4 |
|-------|------|------|------|------|
| $L_1$ | 30   | 40   | 55   | 65   |
| $L_2$ | 30   | 45   | 55   | 70   |
| $L_f$ | 60   | 85   | 110  | 135  |

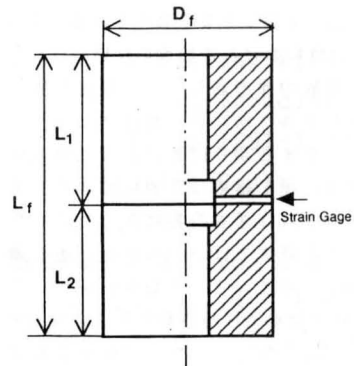
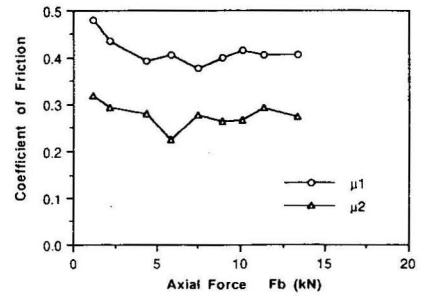
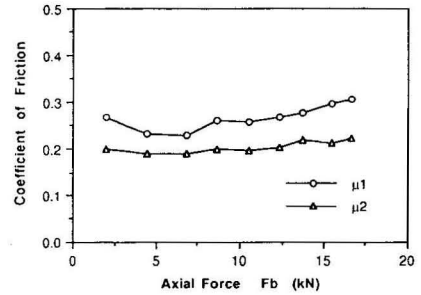


Fig.2 Configuration of clamped cylinder

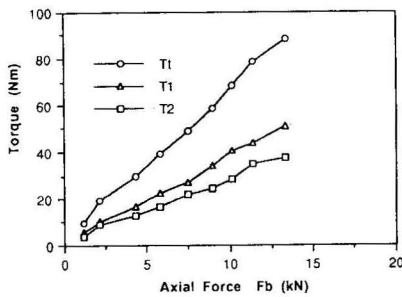
ている。図に示したように、今回の実験では $T_1$ の値は $T_2$ に比べて大きくなっている。接触面の摩擦係数は、ある所定のトルク、軸力を得るために締付けていく過程においても変化すると考えられる。前節で述べたように、計測は各締付け過程に対して10回行なっている。図4は軸力の増加に伴う摩擦係数の変化を示したものである。ねじ面の摩擦係数がナット座面に比べて大きい値を示しており、この傾向は酒井の研究<sup>(2)</sup>と一致している。図から、ひとつの締付け過程においても軸力の増加に伴って摩擦係数は変化している。つぎに締付け、開放を繰り返した場合の摩擦係数の変化を示す。図5は全トルク49kN・mを与えた場合で、横軸が繰り返し数である。ここでは、接触面の状態の変化が摩擦係数に及ぼす影響を検討することを目的としているので、接触面に対して各締付け過程の間に何ら特別な処置はしていない。繰り返し数に対する摩擦係数の変化を予測することはできないが、高い値が長く続くことはないようである。このことは、接触面における締付け、開放の反復によって、表面の凹凸が大きくなると摩擦係数が大きくなり、突起がこわされることにより低下するという現象が繰り返されていると推察される。



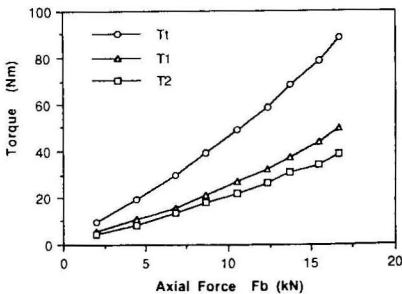
(a) No.2 Bolt



(b) No.4 Bolt

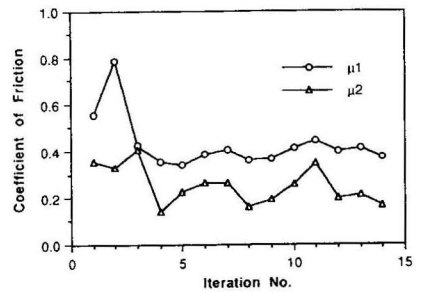
Fig.4 Continuous variations of  $\mu$  in tightening process

(a) No.2 Bolt

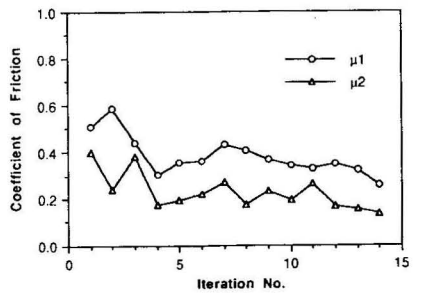


(b) No.4 Bolt

Fig.3 Relations between torque and axial force



(a) No.1 Bolt



(b) No.3 Bolt

Fig.5 Variations of  $\mu$  due to alternation of tightening and loosening

#### 4.2 ボルト締付け完了後の挙動

ボルト締付け完了後のトルク挙動に関しては、池田ら<sup>(3)</sup>、萩原<sup>(5)</sup>、林ら<sup>(6)</sup>の研究がある。トルクレンチによってボルトを締付ける場合、レンチから手を放すとわずかながらナットが戻り回転することはよく経験される。その際、ボルトに与えられたトルクは減少し、結果的には軸力もある程度低下する。このようなトルク、軸力の低下の大部分は締付け完了直後に起こるようである。そこで図6では、締付け時の軸力、トルクに対する締付け完了10分後の値の比率 $\gamma_1$ 、 $\gamma_2$ によって、軸力とトルクの低下率を評価している。ここでは88.2N・mの全トルクを与えている。横軸はグリップ長さで、当然のことながら軸力に比べてトルクの低下率は大きい。また、グリップ長さが大きくなるほど低下率が減少している。理想的には $\gamma_1 = 1$ が望ましいが、グリップ長さが小さい場合はとくに軸力が低下しやすく、このことは‘ねじのゆるみ’に対する傾向とも一致している。池田ら<sup>(3)</sup>はM16、グリップ長さ107mmのモデルにおいて、 $\gamma_1$ が平均値で0.63であるとしている。これは図6で示した値と比較的近いものである。以上のように

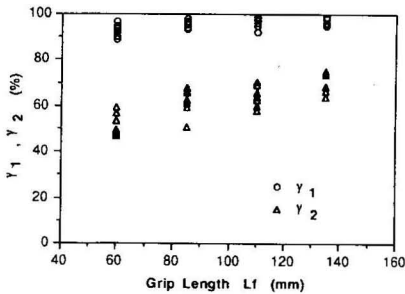


Fig.6 Reduction ratios of axial force and torque

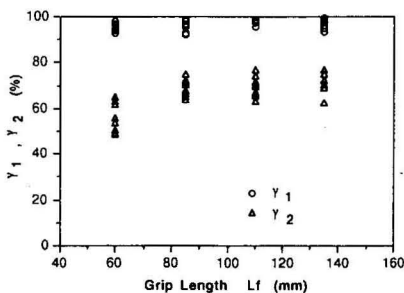


Fig.7 Reduction ratios of axial force and torque (re-tightening)

な軸力低下に対する方策として、増し締めが行なわれている。図7は増し締めを行った場合の結果を図6と同じ条件で示したものである。データのばらつきが大きいので厳密な評価は困難であるが、軸力の低下率はやや改善されており、とくにグリップ長さの小さい場合にその効果は大きいといえる。ナットの戻り回転による軸力の低下率がグリップ長さによって異なるのは、たとえば以下のように推察できる。同じトルクを与えた場合でも、グリップ長さが大きい場合には蓄えられるひずみエネルギーは大きくなる。戻り回転は接触面まわりの局所的な現象であり、それによって解放されるひずみエネルギーが仮に一定であるとする、グリップ長さが大きいほうが低下率が小さいことになる。ナットの戻り回転により引き起こされる現象の解明にはより厳密な考察を必要とするが<sup>(3)</sup>、いずれにしてもゆるみ現象と同様に接触面の摩擦係数が大きく影響すると考えられる。

#### 5 考察

ボルトの締付け作業において問題となるのは、ある軸力を得るためにどれだけのトルクが必要かということである。ある軸力 $F_b$ を得るのに必要な全トルク $T_t$ は式(1)と(3)で表される $T_1$ と $T_2$ の和である。しかしながら式の形が複雑になるので、一般には簡略化して、以下に示すような式が使用されている。

$$T_t = K F_b d \quad (4)$$

ここで $K$ はトルク係数とよばれており、例えば接触面摩擦係数の値を0.15というように仮定して与えられている<sup>(5)</sup>。その結果、必要とする軸力と、使用するボルトの呼びが決まれば全トルクは求められる。しかしながら $T_1$ と $T_2$ の値は摩擦係数によって大きく変化し、また図5に示したように、締付け開放を繰り返すと摩擦係数は大きく変化する。例えばM16を用いて50N・mの全トルクを与えた場合、接触面の摩擦係数を0.2と仮定すると12.1kNの軸力が得られるが、もし実際の値が0.4であれば軸力はほぼ半分の6.3kNしか得られないことになる。したがってトルク係数はある摩擦係数に対する値ではなく、摩擦係数の関数として与えるほうが合理的であると推察される。 $T_2$ は明らかに摩擦係数に対して線形関係にあるが、 $T_1$ は三角関数を含んでいる。そこで全トルクを次式のように変形し、かっこ内の第一項を摩擦係数の一次関数

であると仮定して最小二乗法により係数を決定する。

$$T_t = F_b d \left\{ \frac{d_2}{2d} \tan(\rho' + \beta) + k_2 \mu_2 \right\} \quad (5)$$

図8は、メートル並目ねじ(M1～M64)に対してかっこ内の第一項と摩擦係数( $\mu = 0 \sim 1.0$ ,  $\Delta\mu = 0.1$ )の関係を示したものである。図から両者はほぼ直線関係にあると見なして差しつかえないといえる。その結果、摩擦係数の関数として表したトルク係数Kを用いて、全トルクと軸力の関係は次式で与えられる。

$$T_t = K F_b d$$

$$K = 0.5564\mu_1 + 0.65\mu_2 + 0.0188 \quad (6)$$

ボルトにより構造物を締付ける場合、接触面の摩擦係数の値をあらかじめ知ることは困難である。しかしながら摩擦係数の値は、接触面における潤滑剤の有無、接触面の状態、締付けの対象とする構造物の材質などによって変わってくるので<sup>(2)</sup>、<sup>(3)</sup>、それらを考慮して摩擦係数を与える場合上式は有効であると考えられる。

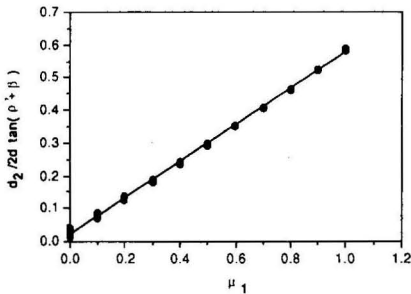


Fig.8 Relation between 1st term of Eq.(5) and friction coefficient on the pressure flank

## 6 結言

トルク法によるボルト締付けに関して、締付け開放に伴う接触面摩擦係数の変化と軸力の関係について検討し、締付け完了後の軸力、トルクの変化および増し締め効果に対するグリップ長さの影響について考察した。また、摩擦係数がトルク法による締付けの精度にもっと大きく影響する因子であることに注目して、その影響を含めたトルク係数を提案した。終わりに臨み、本研究を進めるあたり実験にご協力いただいた神戸商船大学機関学科浅越和雅氏(現大阪商船三井船舶(株))、野口真児氏(現カヤバ工業(株))に謝意を表します。

## 参考文献

- (1) 福岡・ほか3名, 機論(A編), 53-492(昭62-8), 1720.
- (2) 酒井, 機論(第3部), 43-370(昭52-6), 2372.
- (3) 池田・ほか2名, 機論(第3部), 36-290(昭45-10), 1735.
- (4) 山本, ねじ締結の理論と計算, (昭45), 39, 養賢堂
- (5) 萩原, 精密機械, 50-8(昭59-8), 1278.
- (6) 林・ほか2名, 機論(C編), 53-489(昭62-5), 1096.