塑性域締結におけるねじ締結体の挙動*

——締付け停止時のねじ部トルクの影響——

辻 裕 一** 丸 山 一 男**

Behavior of Bolted Joints Tightened in Plastic Region
—Effect of Residual Thread Torque at Termination of Tightening—

Hirokazu TSUJI and Kazuo MARUYAMA

This paper describes the effect of residual thread torque at the termination of tightening on elasto-plastic deformation of bolts under external load after bolted joints are tightened in plastic region. Firstly, the effect of residual torque is analyzed by use of the flow theory of plasticity, and then the relationship between axial tension and thread torque of the bolt is obtained experimentally. The obtained conclusions are as follows: (1) At the beginning of the external loading, after tightening there is the region regarded as elastic deformation on the relation between axial tension and elongation of the bolt, which is extended with the decrease of residual thread torque. (2) It is recommended to slightly loosen the bolt or the nut after tightening so as to reduce residual thread torque to zero, in order to decrease the additional plastic elongation of the bolt.

Key words: fastener, bolt, bolted joint, plastic region tightening, flow theory of plasticity

1. 緒 言

ねじ締結においては弾性域締付け、すなわちボルトの降伏点の60～70%の締付け力を目標として締め付けるのが一般的である。この場合、締付け力はトルク法により管理されることが多いが、ばらつきが大きく信頼性に乏しい。そこで最近、降伏点を超えて締め付ける塑性域締結が注目されている¹⁾。塑性域締結は、大きな締付け力が得られ、しかも締付け力のばらつきも少ないなど、ねじ締結部の性能向上および軽量化における利点があるが、締付け時および締付け後の外力作用時におけるねじ締結体の挙動に不明な点が多い。

特に、塑性域締結されたねじ締結体に外力が作用した場合に、ボルトの塑性伸びが進行し締付け力が低下するのではないかと心配がある。そこでまず、塑性域締結されたねじ締結体に外力が作用した場合のボルト軸力と伸びに関する実験を行い、塑性域締結されたねじ締結体に外力が作用したとき若干の塑性伸びを伴うが弾性変形と見なせる部分があり、ボルト軸力は急速に増大し単軸引張りの関係に一致し、ねじ部トル

クは逆に減少しゼロに近づくことを明らかにし、文献2)で報告した。さらに、上述の現象をひずみ増分理論を用いて解析する方法を提案し文献3)で報告した。しかし、この解析においては、締付け停止時に工具を離れた時にねじ部トルクの減少が生じないと仮定した場合を取り扱っている。

実際のねじ締結体の締付けにおいては、締付け終了後に残留するねじ部トルクは締結体のねじれのスプリングバック、座面における微小なすべり等により減少する。本研究では、締付け停止時に残留するねじ部トルクが、外力が作用した場合のボルトの挙動、特に外力による塑性伸びにどのような影響を与えるか、理論と実験により解析を行ったので報告する。なお実験にはより厳密なデータを得るために新しく試作した弾塑性域締結ねじ性能試験機を用いている⁴⁾。

2. 理 論 解 析

2.1 ひずみ増分理論の適用

塑性変形における応力-ひずみ方程式として、応力と塑性ひずみ増分を対応させたPrandtl-Reussの方程式を用い解析を行う。ひずみ硬化と弾性的な体積変化を考慮した拡張されたReussの方程式は次式で与えられる⁵⁾。

* 原稿受付 平成元年9月7日、昭和61年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和61年10月10日)にて発表

** 正 会 員 東京工業大学精密工学研究所(横浜市緑区長津田町4259)

Fig. 1 Stresses and coordinate in a cylinder

$$d\varepsilon_{ij} = \frac{1-2\nu}{E} \delta_{ij} d\sigma_m + \frac{d\sigma'_{ij}}{2G} + A \frac{3d\bar{\sigma}}{2H'\bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad (1)$$

$$H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\varepsilon^p} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} A &= 1 & (d\bar{\sigma} > 0) \\ A &= 0 & (d\bar{\sigma} < 0) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、 ε_{ij} は対数ひずみ、 σ_m は平均垂直応力、 σ'_{ij} は偏差応力、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 ν はポアソン比、 E は縦弾性係数、 G は横弾性係数、 $d\varepsilon^p$ は相当塑性ひずみ増分、 H' はひずみ硬化を表す係数である。材料が降伏条件を満たし、かつ $d\bar{\sigma} > 0$ の場合、 $A=1$ とおき式(1)の中の塑性変形に関する項を考慮する。 $d\bar{\sigma} < 0$ の場合、材料は除荷過程にあり弾性変形すると考え $A=0$ とおく。また材料が降伏条件を満たさず弾性変形する場合も $A=0$ とおく。材料は等方性材料で等方硬化を示し、図2に示す弾線形硬化塑性体であると仮定する。降伏の判断はMisesの降伏条件による。すなわち $\bar{\sigma}$ が単軸引張りの降伏点 σ_{ys} を超えた時、降伏が生じる。これを初期降伏条件とする。初期降伏後の降伏条件はひずみ履歴の関数となり、 $d\bar{\sigma} < 0$ となる直前の $\bar{\sigma}$ で与えられる。単軸引張りの場合 ($\bar{\sigma} = \sigma$) では、図2に示すように除荷およびその後の再降伏を表すことができる。

円柱を平面応力状態を有する薄肉円筒の集合と仮定し、この薄肉円筒に z 軸方向の引張りおよび z 軸回りのねじりが負荷される場合、次式が得られる。座標および応力を図1に示す。

$$\sigma_m = \frac{1}{3} \sigma_z \quad (4)$$

$$\sigma_z' = \frac{2}{3} \sigma_z, \quad \sigma_r' = -\frac{1}{3} \sigma_z, \quad \sigma_\theta = -\frac{1}{3} \sigma_z \quad (5)$$

$$\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_z'^2 + 3\tau_{z\theta}^2} \quad (6)$$

式(1)の応力-ひずみ関係式は式(4)~(6)より各薄肉

Fig. 2 Stress-strain curve for linear hardening elasto-plastic body

Fig. 3 Model of bolt and nut for analysis

円筒について次のように表される。

$$\begin{pmatrix} d\varepsilon_z \\ d\gamma_{z\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{E} + A \frac{\sigma_z^2}{H'\bar{\sigma}^2} & A \frac{3\sigma_z \tau_{z\theta}}{H'\bar{\sigma}^2} \\ A \frac{3\sigma_z \tau_{z\theta}}{H'\bar{\sigma}^2} & \frac{1}{G} + A \frac{9\tau_{z\theta}^2}{H'\bar{\sigma}^2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d\sigma_z \\ d\tau_{z\theta} \end{pmatrix} \quad (7)$$

円柱の伸び δ およびねじれ角 θ が与えられれば、式(7)より σ_z および $\tau_{z\theta}$ が得られる。さらに、円柱に作用する軸力 F とトルク T は次式で与えられる。

$$F = 2\pi \int_0^{D/2} \sigma_z r dr \quad (8)$$

$$T = 2\pi \int_0^{D/2} \tau_{z\theta} r^2 dr \quad (9)$$

解析はボルト・ナットを図3に示す段付き丸棒としてモデル化して行う。遊びねじ部は、直径がねじの有効断面の直径 d_s 、長さが遊びねじ部長さ l_s と等しい円柱に置き換える。ボルト頭部およびめあいねじ部を、ボルトの呼び径 d と等しい直径の円柱に置き換える場合の等価長さは、後述の実験結果より、それぞれ $0.62d$ とする。ボルト円筒部の断面積はねじの有効断面積より大きいので、塑性変形は遊びねじ部で生じるとし、他の部分は弾性変形のみ生じるとして上述の理論を適用する。締付け時にはボルト軸力 F_b とねじ部トルク T_s は次式の関係が成立するとして計算する。

Table 1 Properties and dimensions of bolt for analysis

d mm	d_s mm	l_s mm	l_n mm	σ_{ys} MPa	H' MPa	E GPa	G GPa	ν
10	8.59	20	25	1 060	3 500	206	79.2	0.3

Fig. 4 Relation between δ , F_b and T_s obtained by the theory ($T_{s2}=0.85T_{s1}$)

$$T_s = \frac{1}{2} F_b \cdot d_2 \left(1.15 \mu_s + \frac{P}{\pi d_2} \right) \quad (10)$$

ここで、 μ_s はねじ部摩擦係数、 d_2 はおねじ有効径の基準寸法、 P はピッチである。また外力負荷時に相当する計算は、ボルト両端間のねじれ角を一定とし、ボルトの伸びに増分を与えることにより行う。締付けおよび外力負荷に相当する解析の詳細は前報による³⁾。

2.2 解析結果

計算に用いた各部の寸法および材料定数を表1に示す。 σ_{ys} および H' はボルトの単軸引張りの実験結果より決定した。後述の実験結果と対比させ、ねじ部の摩擦係数 $\mu_s=0.14$ 、締付け停止点のボルトの伸びは $\delta=0.30$ mm として解析を行った。

図4に解析より得られたボルト軸力 F_b とねじ部トルク T_s およびボルトの伸び δ の関係を示す。締付け停止点における T_s の減少が15%の場合の結果である。締付け終了直前の T_s を T_{s1} 、終了時に残留する T_s を T_{s2} とすれば、この場合 T_s は $T_{s1}=52$ N·m から $T_{s2}=44$ N·m に減少する。ただし減少量は締結体のねじれ剛性、締付条件等に支配されるため、締結体ごとに異なる。比較のため単軸引張りの場合の F_b - δ 関係を図中に破線で示す。締付け停止点における T_s の減少後に外力を作用させると、 δ の増加に伴い F_b は急速に増大し、単軸引張りの場合の F_b - δ 関係に近づく。この増大部分の前半の曲線の傾きは弾性変形の場合とほぼ等しい。 F_b が弾性変形すると見なせる範

Fig. 5 Relation between δ , F_b and T_s obtained by the theory ($T_{s2}=0$) Fig. 6 Relation between δ , F_b and T_s obtained by the theory ($T_{s2}=T_{s1}$)

囲では T_s はほぼ一定値を示し、弾性変形状態から逸脱した後は T_s は δ の増加に伴い減少する。

図5は $T_{s2}=0$ N·m の場合における F_b , T_s - δ 関係の解析結果である。外力作用時に F_b の変化が弾性変形と等しいと見なせる範囲は図4の結果と比較して広い。 T_s は、 δ にかかわらずゼロの一定値である。

図6は締付け停止点における T_s の減少がない場合における F_b , T_s - δ 関係の解析結果である。前報ではこの場合についての解析を行っている²⁾。外力作用時に F_b は増加するが、その傾きは弾性変形より緩やかであり、上述の2例と異なり外力負荷の初期から無視できない塑性伸びがボルトに生ずる。

図7に解析より求めた、ボルト遊びねじ部の外周部(ねじ部は円柱にモデル化)における応力経路、すなわち引張応力 σ_z とせん断力 $\tau_{z\theta}$ の関係を示す。この応力経路は図4に示す解析結果に対応する。縦軸を $\sqrt{3} \tau_{z\theta}$ とすれば $\bar{\sigma} = \sqrt{\sigma_z^2 + 3\tau_{z\theta}^2} = \sigma_{ys}$ より、初期降伏曲線は円で表示され、これを図中に実線で示す。 σ_z と

Fig. 7 Relation between σ_z and $\tau_{z\theta}$ at the free thread portion of the bolt obtained by the theory

Fig. 8 Variation of boundary radius of elastic and plastic zone by the theory

$\tau_{z\theta}$ は最初比例関係で増加し初期降伏曲面と交差した後、塑性状態になり比例関係は終わる。締付け停止点において、 F_b が一定のまま T_s が減少するため、 σ_z は一定値を保ち $\tau_{z\theta}$ は減少する。ここでは $d\bar{\sigma} < 0$ のため弾性的な挙動を示し、新しい降伏曲面は破線で示す円で表される。円の半径の増加は締付けによる塑性変形により生じたひずみ硬化に相当する。ここで外力が作用すると、応力が降伏曲面の内側にあるため弾性的な挙動を示し、 $\tau_{z\theta}$ が一定の状態で σ_z が増加する。さらに外力が増加し応力が新しい降伏曲面と交差すると再び塑性状態となり、 σ_z の増加に従い $\tau_{z\theta}$ は減少する。

遊びねじ部の軸心近傍における応力経路は外周部と大きく異なる。 $\tau_{z\theta}$ はゼロで一定であり、 σ_z だけで降伏条件が決まる。締付け停止点では T_s の減少による $\tau_{z\theta}$ の減少がなく、 $\bar{\sigma}$ は一定値を保つため、外力が作用した場合にただちに応力は降伏曲面の外側となり塑性状態となる。

図8に遊びねじ部の弾塑性境界半径 r_c の変化を示す。これは図4に示す解析結果に対応する。 $\delta = 0.19\text{ mm}$ で外周部より塑性変形が始まり $\delta = 0.23\text{ mm}$ で断面全域が塑性状態になる。締付け停止点では、 T_s の減少により断面全域が弾性状態になる。次に外力が作用すると、前述の理由より、新しい降伏曲面により断面の中心部より再び塑性変形を生じる。これは、締付け時の降伏が外周部から生じるのと逆である。

Fig. 9 Schematic diagram of fastener performance testing machine for bolted joint tightened in elastic and plastic region

3. 実験

3.1 実験方法

試験に用いたボルトは呼び M 10, 強度区分 10.9 で表面処理はショットブラスト, ナットは強度区分 12 で高さは 10 mm である。締付けおよび締結体への外力負荷の実験は、図9に示す弾・塑性域締結ねじ性能試験機⁴⁾を用いる。試験機では締付けトルクは DC サーボモータにより、外力は油圧シリンダにより与えられ、締付けから外力負荷まで連続して試験が行える。試験中のボルト軸力、締付けトルク、ねじ部トルク、座面トルク、負荷外力、さらにボルトの伸びおよびねじれ角の測定が可能である。図10に締結体(ロードセル)の概略図を示す。締付長さ $l_t = 45$

Fig. 10 Model of bolted joint (Load cell)

 Fig. 11 Relation between δ , F_b and T_s obtained by experiments for M 10, 10.9 ($T_{s2}=44 \text{ N}\cdot\text{m}$)

mm, ボルト遊びねじ部の長さ $l_s=20 \text{ mm}$ である。ねじ面とナット座面の潤滑には #120 マシン油を用いる。ナット回転速度は 4 rpm である。

3.2 実験結果

図 11 にボルト・ナットを塑性域まで締め付け、その後外力を作用させた場合の F_b , T_s - δ 関係を示す。また比較のため単軸引張りの場合の F_b - δ 関係を図 11 中に破線で示す。締め付け停止点は $\delta=0.30 \text{ mm}$ である。ボルト・ナットを締め付けると $\delta=0.21 \text{ mm}$ の点で降伏が始まる。降伏が生じる F_b は単軸引張りの場合の 85% である。さらに δ が増加するとひずみ硬化により F_b は増大し、 T_s も、ねじ部摩擦係数で決定される割合を保ちつつ増大する。締め付け停止点において

 Fig. 12 Relation between δ , F_b and T_s obtained by experiments for M 10, 10.9 ($T_{s2}=0 \text{ N}\cdot\text{m}$)

 Fig. 13 Relation between δ , F_b and T_s obtained by experiments for M 10, 10.9 ($T_{s2}=T_{s1}$)

工具 (ソケット・レンチ) をナットから離すと、 T_s は減少し、 $T_{s2}=44 \text{ N}\cdot\text{m}$ となった。ここで締結体に外力を作用させると、 δ の増加に伴い F_b は急速に増大し、単軸引張りの場合に一致し、その後は単軸引張りの F_b - δ の関係に従う。 F_b の急速な増大の前半部分の曲線の傾きは、ボルトが降伏前に弾性変形する場合と等しい。ボルトが弾性変形する場合の関係を図に一点鎖線で示す。この部分ではボルトは弾性変形すると見なすことができる。後半部分においては曲線の傾きはやや緩やかになる。一方、 T_s は、 F_b が急速に増大する前半部分では、ほぼ一定値を示し、その後 T_s は減少しゼロに近づく。

図 12 に、締め付け停止点で T_s がゼロになるまでナットを強制的に戻し ($T_{s2}=0$)、その後、外力を作用させた場合の F_b , T_s - δ 関係を示す。ただし、ナットの戻しによる F_b の減少はほとんど認められない。締結体に外力が作用すると、 F_b は急速に増大する。この部分ではボルトは弾性変形すると見なすことがで

Fig. 14 Influence of T_{s2} on relation between F_t and δ_t

き、その範囲は図 11 に示す場合より大きい。 T_s は、外力の変化にかかわらずほぼゼロの一定値となる。

図 13 に締付け停止点で T_s の減少が生じないようにし、外力を作用させた場合の F_b , T_s - δ 関係を示す。ただし厳密には、締付け停止点において T_s は 7% の減少を示す。締結体に外力が作用すると、 F_b は急速に増大するが、その傾きはボルトが弾性変形する場合と比較し小さい。 F_b が増大するに従い、 T_s は減少しゼロに近づく。

4. 考 察

締結体に外力が作用した後の軸力の減少量は、ボルトの塑性変形により追加される塑性伸びの量に依存する。この量は前述のように締付け停止後に残留するねじ部のトルク T_{s2} およびひずみ硬化に支配される。締付け停止点で T_s の減少がある場合には外力作用時にボルトは再び弾性的な挙動を示す。またこの領域では T_s は一定値を示す。これは、弾性域締付けの場合に、残留する T_s はボルトが降伏するまで一定値を示すことと類似の現象である。理論解析結果は実験結果に見られるこれらの現象をよく表しており、理論解析に用いたモデルの妥当性が確認された。

図 14 に、外力作用時にボルトに追加される軸力 F_t と追加される伸び δ_t の関係に及ぼす T_{s2} の影響を、実験結果をマークで、解析結果を線により比較して示す。また、ボルトが弾性変形する場合の関係を直線で示し、直線との差が塑性伸びを表す。外力による軸力低下を最小にするためには F_t - δ_t 関係は単軸引張りの弾性変形直線に近いことが必要である。実験結果およ

び解析結果より締付け停止点における T_{s2} が少ない程、ボルトは弾性的な挙動を示し、塑性伸びは減少する。ねじ締結部の組立において、 $T_{s2}=0.85 T_{s1}$ が通常の締付け後の状態に相当するので、したがって、締付け後に T_{s2} がゼロになるようにボルト頭またはナットを緩め方向に若干戻すことが望ましい。

5. 結 言

塑性域まで締め付けられたねじ締結体において締付け停止点における残留ねじ部トルクが、外力作用時のボルト伸びおよび軸力に及ぼす影響を解析および実験により明らかにした。主な結果をまとめると以下のとおりである。

- (1) ボルトは、締付け停止点でねじ部トルクの減少がある場合、外力作用時に弾性的に挙動すると見なせる範囲があり、その範囲は締付け停止点で残留するねじ部トルクが減少するに伴い増大する。
- (2) ボルトは、締付けの場合外周部より降伏が始まるが、締付け後外力負荷の場合軸心側から再降伏が始まる。
- (3) ねじ締結部の組立の際、締付け後の残留ねじ部トルクがゼロになるようにボルトまたはナットを緩め方向に戻すことが望ましい。

最後に、本研究に対し御協力頂いた東京工業大学精密工学研究所機械工場の職員各位に、また試験片を提供して頂いた(株)佐賀鉄工所、(株)サトーラシの関係各位に感謝の意を表する。なお、本研究は、昭和 60 年度科学研究費補助金・奨励研究(A)の補助を受けた。

参 考 文 献

- 1) E. A. Cornelius u. F. O. Kwami : Die Steigerung der Sicherheit von Schraubenverbindungen durch überelastisches Anziehen, Konstruktion, 18, 4, (1966) 142.
- 2) 丸山一男, 中川正人 : 塑性域締結におけるねじ締結体の挙動, 精密工学会誌, 53, 3 (1987) 416.
- 3) 辻 裕一, 吉田総仁, 丸山一男 : 塑性域締結におけるねじ締結体の挙動——ひずみ増分理論による解析, 精密工学会誌, 54, 1 (1988) 189.
- 4) 丸山一男, 辻 裕一, 市原浩一 : 弾・塑性域締結ねじ性能試験機の試作, 精密工学会誌, 54, 10 (1988) 1933.
- 5) 山田嘉昭 : 塑性力学, 日刊工業新聞社 (1965) 73.