研 究

塑性域締付けにおけるボルトの再使用特性*

大 橋 宣 俊** 石 村 光 敏**

Reusing Characteristics of Bolts
in Plastic Region Tightening

Nobutoshi OHASHI and Mitsutoshi ISHIMURA

In this paper, the comparison of the elastic region tightening with the plastic region tightening is investigated with emphasis on reusing characteristics of bolts. The tightening and loosening of bolts and nuts are repeated in tightening tests by the torque gradient, the angle and the torque control methods, respectively. The following results are experimentally confirmed: (1) The tightening axial force increases with number of repetitions by every control method, but the torque gradient control method which tightens bolts to the limit of elasticity is the most stable one. (2) The torque

gradient control method is superior to other ones with regard to the reusing characteristics in the condition that an external force is loaded and unloaded to the fastened bodies in the direction of the bolt axis. (3) Plastic elongation of the bolts by the angle control method of plastic region tightening generates at the idle thread part between the fastened bodies, and then spreads to the fitting part of the bolts and nuts as the number of repeated tightening increases, so that the number of reusing cycle is limited.

Key words: bolted joint, torque control method, torque gradient control method, angle control method, elastic region tightening, plastic region tightening, reusing characteristic

1. 緒 言

近年、機械類は生産性やエネルギー効率を上げるために高速化、高強化、大形化また軽量化が進められている。これに付随して機械の部品と部品を結合するねじ締結体の合理的な設計及び合理的な締付技術が追求されている。

ねじ締結体の設計においては、締結体としての機能を十分に果たす適正な締付け力を、締結体に作用する外力、ねじ部品及び被締結物の機械的性質などを考慮に入れて決定し、組立作業においてはその値にいか精度良く締め付けられるかがねじ締結体の信頼性にとって重要である。

従来、ねじはボルトの弾性限界内で締め付け、また締結体に外力が作用してもボルトが弾性限界を超えないよう十分余裕を見込んで設計されてきた。この弾性限界内の締付軸力の管理は、締付けの際のトルク値によるトルク法が広く用いられているが、摩擦係数が不安定であるので締付軸力のばらつきは±30%程度は避けられない¹⁾²⁾。最近、高い締付軸力を得、またボルト自体の特性を利用してばらつきの小さな締付軸力管理を行うためにボルトの弾性限界または塑性域まで締め付ける方法（以下これを総称して塑性域締付けという）が注目されている^{2)~4)}。弾性限界の締付けには、締付回転角に対する締

付けトルクの勾配の変化からボルトの弾性限界を検出して締付軸力を管理するトルク勾配法が、塑性域の締付けにはボルトの伸びに対応するナットの回転角によって軸力を管理する回転角法がとられる。しかし、これらの管理法の締付特性は十分には明らかにされていないので使用範囲は一部に限定され、幅広く一般に使われるところまで至っていない。特に塑性域締付けを行ったボルト・ナットを一度ゆるめた後再使用できるかどうかは重要な問題である。

そこで本研究では、ボルトの弾性域から塑性域までの締付特性を検討できる装置を試作し、これによってボルト・ナットの再使用特性に重点を置いて塑性域締付けと従来の弾性域締付けを比較検討した結果について述べる。

2. 実 験 方 法

試作した実験装置の軸力及びトルク検出部を図1に示す。図1(a)は締付けの際の状態であって、変速モータ、電磁クラッチ・ブレーキ、減速機、締付けトルク T_f 測定用トルクセル、六角ソケットを通してナットを回転するようにになっている。円筒部①及び②は円筒部③に固定され、円筒部③は定盤に固定されている。試験ボルトは円筒部①の先端に固定され、円筒部②、座面板固定具及び座面板をナットで挟み締め付ける。この際、円筒部①及び②の軸方向に貼付したひずみゲージによって軸力 F_f 及び締付圧縮力 F_c が検出される。また同じ円筒

* 原稿受付 昭和59年1月13日。昭和58年度精機学会秋季大会学術講演会（昭和58年10月16日）にて発表

** 正 会 員 相模工業大学（藤沢市辻堂西海岸1-1-25）

Fig. 1 Torque and axial force detecting section of experimental equipment

部の軸に対し45°方向に貼付したひずみゲージによってねじ部トルク T_s と座部トルク T_w が検出される。図1(b)は(a)で締付けが完了した後、座面板固定ボルトを取り外し負荷外力用円板を取り付け、定盤に固定された2個の油圧シリンダによってボルト軸方向外力 W を負荷している状態である。この際に負荷外力は円筒部③の軸方向に貼付したひずみゲージによって検出される。

ひずみゲージによって検出した軸力、トルクなどは動ひずみ計で増幅し、ペンレコーダで記録する一方、A-D変換器を通してマイクロコンピュータに入れ、データのファイル、トルクの勾配、軸力の勾配などの計算をさせると共にある設定値になると電磁クラッチ・ブレーキが作動し締付けの停止が出来るようになっている。ナットの回転角は締付速度が一定ならば時間に比例するので回

Fig. 2 Relation between compressive force F_c and displacement e at fastened portion in testing machine

転角の代わりにコンピュータの内部クロックを用いている。なお今回の実験ではすべて締付速度は2 rpm 一定で行った。

試験装置のボルト頭部首下とナットの間に挟まれる部分すなわち被締結部の圧縮力 F_c -変位量 e との関係は図2に示すごとくであり、直線部ではね定数を計算すると $K_e=196 \text{ MN/m}$ である。

今回の実験に使用したボルト、ナット、座面板及び潤滑剤とその組合せ記号を表1に示す。

3. 実験結果及び考察

表面処理なしのボルト・ナットに120マシン油を塗布した組合せ(表1の組合せ記号A-120M)において、ナットを各 θ まで締付け回転し、その後ゆるめ、ボルトの永久伸び λ 及びボルトに6g GRの限界ねじゲージを通してゲージが停止したボルト頭部首下からの距離 l を測定した結果を図3に示す。ボルトの永久伸び λ は $\theta=160^\circ$ で現れ、その後 θ の増加に伴って大きくなる。一方ゲージは $\theta=150^\circ$ までは不完全ねじ部まで通過するが、これ以後永久伸びが発生する $\theta=160^\circ$ から 300° の間は締付長さより2山程度入った点で停止する。すなわち $\theta=$

Table 1 Condition of experiments

	Bolts and Nuts			Washer plate	Lubricant	Symbol in combination Bolts, Nuts, Lubricant
	Hexagon head bolts (JIS B 1180)	Hexagon nuts, type-2 (JIS B 1181)	Surface treatment			
Thread size	M 10	M 10	No-plating	Hardness: HRC 36	120-Machine oil	A-120 M
Thread tolerance	6 g	5 H		Surface roughness; 12.5 s	MoS ₂ past	A-MoS ₂
Length under head	65	—	Zn-plating	Surface treatment; no-plating	120-Machine oil	B-120 M
Mechanical properties class	8.8*	8			MoS ₂ past	B-MoS ₂

* Mean value of yield point $\sigma_y=844 \text{ N/mm}^2$, Standard deviation of yield point $S\sigma_y=7.6 \text{ N/mm}^2$

Fig. 3 Plastic deformation of bolts (A-120 M)

 Fig. 4 An example of θ - F_f , T_f , T_s , T_w in experiments (A-120 M)

160~300°間の永久変形は締付け間の遊びねじ部で発生し、ボルト・ナットはめあい部のねじ山には影響しないことが分かる。 $\theta=350^\circ$ 以後は永久変形がボルト・ナットはめあい部へ進展していく。

A-120 Mの組合せにおいて、ボルトが破断するまで締め付けたときのナット回転角 θ に対する締付軸力 F_f 、締付トルク T_f 、ねじ部トルク T_s 、座部トルク T_w の記録例を図4に示す。 $\theta=400^\circ$ までは T_f と T_s+T_w は良く一致しているが、それ以後では T_w 測定用ひずみゲージのひずみ量と T_w が比例せず、見かけ上 T_w が大きく表れていると思われる。 θ - F_f 曲線は⑥点で直線から離れ、その後⑥点において勾配が急変している。この⑥点の θ において θ - T_f , T_s , T_w 曲線も勾配が急変する。また⑥点は図3の永久伸びが発生し始める $\theta=160^\circ$ とほぼ一致している。したがって、この点がボルトの軸部まで塑性域に入る点と考え、これ以後の締付けをここでは塑性域締付けとする。⑥点以後、 F_f はわずかずつで

 Fig. 5 An example of θ - T_f , F_f , $dT_f/d\theta$, $dF_f/d\theta$ in experiments (A-120 M)

Fig. 6 A method of calculation of torque gradient and sampling of data by micro-computer

はあるが $\theta=600^\circ$ 付近まで上昇するのに対し、 T_s はほぼ一定、 T_w は座面のかじりが発生する 400° から上下しながら上昇する。

3.1 締付管理法の比較

図5は θ に対する T_f , F_f 及びそれらの勾配 $dT_f/d\theta$, $dF_f/d\theta$ の実験結果の一例である。 θ - $dT_f/d\theta$, θ - $dF_f/d\theta$ は図6に示す方法でコンピュータで回転角 1° 当たり1個のデータをサンプリングし、3点間の平均の勾配を 1° 当たり計算して描いたものである。図中の $n=1$ は最初の締付け、 $n=2$ は同一ボルト・ナットをゆるめ再締付けをした線図である。 $n=2$ では弾性限界付近の勾配はなめらかになり上昇している。いずれも θ に対する $dT_f/d\theta$ と $dF_f/d\theta$ の傾向は良く一致している。したがってトルクの勾配が最大値 $(dT_f/d\theta)_{\max}$ から急激に低下する時点で締付けを停止するとボルトの弾性限界付近の軸力で締付けができる。ここでは $1/3(dT_f/d\theta)_{\max}$ で締付けを停止して締付軸力を管理する方法をトルク勾配法とする。

Fig. 7 Relation between coefficient of friction at the thread portion μ_s and axial force F_f ($n=1$)

表1のボルト、ナットの表面処理と潤滑剤の組合せ4種類について、トルク勾配法、回転角法及びトルク法で締め付けた軸力の平均値 $\bar{F}_f$ とばらつき $\bar{F}_f \pm 2S_{F_f}$ (S_{F_f} は軸力の標準偏差) をねじ部摩擦係数 μ_s を横軸にとり整理した結果を図7に示す。同一条件の実験回数は10回である。回転角法の締付回転角はボルトの永久変形がボルト・ナットはめあい部までに至らない 200° 、トルク法の締付けトルクは目標軸力をボルト規格耐力の70%として文献2)を参考に120マシン油潤滑の場合はトルク係数を0.2として求めた $51 \text{ N}\cdot\text{m}$ 、二硫化モリブデンペースト潤滑の場合はトルク係数を0.15として求めた $38 \text{ N}\cdot\text{m}$ である。 μ_s は締付けの途中のボルト弾性域の軸力 ($F_f = 25.5 \text{ kN}$: ボルト規格耐力の70%) においてねじ部トルク T_s を測定し式(1)で算出した値である。図中の $\bar{A}_s \sigma_f$ 曲線は式(2)のせん断ひずみエネルギー一説による降伏条件式に式(3)、(4)を適用して求めたボルトの降伏軸力である。

$$\mu_s = \frac{2T_s \cos \alpha'}{d_2 F_f} - \cos \alpha' \tan \beta \quad (1)$$

$$\sigma_v = \sqrt{\sigma_f^2 + 3\tau^2} = \bar{\sigma}_y \quad (2)$$

$$\sigma_f = \frac{F_f}{\frac{\pi}{4} d_s^2} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{T_s}{\frac{\pi}{16} d_s^3} = \frac{2d_2}{d_s} (\tan \beta + \mu_s \sec \alpha') \sigma_f \quad (4)$$

ここで、 d_2 : おねじの有効径、 d_s : 有効断面積 A_s に対応する直径で d_2 と谷径 d_3 の平均、 β : ねじのリード角、 α' : ねじ山直角断面における山の半角、 $\bar{\sigma}_y$: ボルト材の平均降伏点 (表1の $\bar{\sigma}_y$)、 σ_f : 締付軸応力、 σ_v : 等価応力、 τ : せん断応力。

トルク勾配法の平均軸力と $\bar{A}_s \sigma_f$ 曲線はよく一致しており、 μ_s が $0.06 \sim 0.13$ の変化に対し軸力は $44 \sim 40 \text{ kN}$ となっている。また軸力のばらつきも $\bar{\sigma}_y \pm 2S_{\sigma_y}$ で求めた $\bar{A}_s \sigma_f \pm 2S_{A_s \sigma_y}$ の範囲内にほぼ入っている。回転角法の軸力はトルク勾配法の軸力より $3 \sim 7\%$ 増大し、ばらつきはほぼ同程度であり、軸力の変動係数 $S_{F_f}/\bar{F}_f$ は $0.01 \sim 0.03$ である。これに対しトルク法ではばらつきが大きく $S_{F_f}/\bar{F}_f$ は $0.05 \sim 0.1$ である。

3.2 繰返し締付特性

表1のA-120Mの組合せにおいて、同一ボルト・ナットを前述の3種類の締付方法で締付け-ゆるめの繰返し締付実験を行った。締付繰返し数 n に対する F_f , T_f , T_s , 及び座部トルク T_w の変化を最初の締付け ($n=1$) の平均値を基準にして示したのが図8である。各締付方法での実験回数は10回であり、 $n=1$ の平均値は図中の数値で、各締付繰返し数におけるばらつきの範囲を標準偏差を $n=1$ の平均値で除して示している。

いずれの締付方法とも n の増加に伴って F_f はわずかず上昇し、 $n=5$ の $n=1$ に対する上昇率はトルク法及び回転角法で10%、トルク勾配法で5%になっている。これは、トルク法では接触運動する部分のなじみによる摩擦係数の減少、トルク勾配法では μ_s の減少、回転角法ではボルトの加工硬化による影響によるものと考えられる。トルク法での F_f のばらつきは n の全域にわたり

Fig. 8 Change of F_f , T_f , T_s , T_w by number of cycles n in tightening (A-120M)

Fig. 9 Plastic deformation of bolts on angle control method (A-120 M)

 Fig. 10 Example of W - F_t in experiments (A-120 M)

$S_{F_f}/\bar{F}_f = 0.05$ 程度なのに対し、トルク勾配法及び回転角法では 0.014 と小さい。 T_w のばらつきはトルク勾配法及び回転角法の面圧が高くなるのでトルク法より大きくなっている。

図 9 は回転角法で同一ボルト・ナットを締付繰返しごとに図 3 と同様にボルトの永久伸び λ と限界ねじゲージの停止するボルトの頭部からの距離 l を測定した結果である。 n の増加に伴って λ は増大するが、 $n=5$ の範囲では永久変形がボルト・ナットはめあい部まで至っていない。これ以上になると永久変形がはめあい部に達するので $n=5$ 程度が再使用の限界となる。なおトルク法及びトルク勾配法では永久変形は発生しない。

3.3 外力を負荷した場合の繰返し締付特性

表 1 の A-120 M の組合せのボルト・ナットを前述の 3 種類の方法で締め付けた後にボルト軸方向外力 W をボルトが破断するまで負荷したときの W -ボルト軸力 F_t の記録例を図 10 に示す。 W の増加に伴って F_t は F_f 点から直線で増加し、その後曲線に変化する。直線区間の $\Delta F_t/\Delta W$ がねじ締結後に初めて W を負荷したときの内力係数 $\Phi(1)$ になる。 F_t 曲線が W - F_t で 45° に引いた線と接した点で座面分離が生ずる。この外力が座面分離外力 W_s になる。その後 F_t は 45° の線上を上昇するボ

 Fig. 11 Relation between axial force F_f, F_t and repeated number n of external force W

ト単体の引張状態になり、最大負荷外力 W_{max} の点で折り返し、 45° の線上を下降してボルトは破断する。

図 11 に上述と同じ条件で締め付けた後、 W を繰返し負荷したときの W - F_t, F_f の記録例及び W を 3 段階で 20 回繰返し負荷した場合の繰返し数に対する F_f の変化を示す。いずれも W を 1 回負荷すると F_f は最初の締付軸力 F_{f1} から 2~8% 低下する。その後、 $W=32.3$ kN 以上ではわずかずつではあるが F_f の低下は進む。 $W=26.5$ kN では 10 回以降は低下は進まない。記録例からわかるように 2 回目以降の $\Delta F_t/\Delta W$ は変化しないので、これを 2 回目以後の内力係数 $\Phi(2)$ とする。

図 12 に、締付け $\rightarrow W=26.5$ kN を負荷 $\rightarrow$ 除荷 $\rightarrow$ ゆるめを 1 サイクルとしてこれを 5 回繰り返した場合の F_f 及び F_t の変化の平均値とばらつきを示す。同一条件の実験回数は 5 回である。いずれの締付方法とも F_{f1} は図 8 の傾向と一致し、 F_t 及び F_{f2} は F_{f1} とほぼ平行を保っている。また 1 サイクルごとに図 3 と同様に λ と l を測定した結果は前節の繰返し締付けの結果と同じである。したがって外力負荷は次の締付軸力に影響しないことが分かる。なお外力負荷によって λ が進行しないのは締付け完了直後にボルトの弾性ねじれの一部が回復しねじ部トルク T_s が減少するのに伴ってせん断応力 τ が減少し降伏に対する軸方向内力に余裕ができ弾性挙動を示す結果と考えられる。

図 13 に $\theta=0^\circ$ からボルトが締付け破断する $\theta=1000^\circ$ の間で上述の $W_s, W_{max}, \Phi(1), \Phi(2)$ 及び F_f を求めた結果を示す。 W_{max} が全締付角度に対しほぼ一定であることからボルトの締付けによる塑性変形は静的強度に影響

Fig. 12 Relation between number of cycles in tightening and axial force for three methods (A-120 M)

Fig. 13 θ - F_f , $W_{\max}$, W_s , $\phi(1)$, $\phi(2)$ (A-120 M)

しないことが分かる。内力係数は F_f の増加に伴って小さくなり、塑性域に入ると全域にわたり $\phi(1)=0.05$, $\phi(2)=0.08$ ではば一定である。また座面分離外力 W_s は F_f と同じ傾向を示す。

4. 結 言

ねじの締付試験機を設計試作し、これによってボルト・ナットの再使用特性に重点を置いて塑性域締付けと

弾性域締付けを比較検討した。得られた主な結論は次の通りである。

- (1) 同一ボルト・ナットを繰り返し締め付けた場合に繰返し数と共に軸力は少しずつ高くなり、5回目の1回目に対する上昇率はトルク法、回転角法で10%、トルク勾配法で5%であった。特に弾性限界まで締め付けるトルク勾配法は安定しており、再使用特性は優れている。
- (2) 締結体にボルト軸方向外力を繰り返し負荷することも含めて再使用特性を3種類の方法について検討したが、その

結果は(1)の結論と同じであった。

- (3) 回転角法によるボルトの永久伸びは締付け間の遊びねじ部で発生し、締付繰返し数と共にボルト・ナットはめあい部に進展していくので再使用回数は制限される。

この研究は工業技術院の委託によって日本ねじ研究協会に設けられた塑性域ねじ締結調査研究委員会(委員長・北郷薫)の研究の一部として行ったものである。この研究に御協力と御教示いただきました東京工業大学精密工学研究所の吉本勇教授、丸山一男助教授を始め多くの方々に感謝の意を表します。

文 献

- 1) 北郷 薫ほか: トルク法におけるねじの適正締付けに関する研究, 精密機械, **39**, 7 (1973) 748.
- 2) 丸山一男ほか: 高強度ボルトの締付け管理に関する研究, 精密機械, **47**, 4 (1981) 436.
- 3) G. H. Junker: Moderne Steuerungsmethoden für das motorische Anziehen von Schraubenverbindungen, VDI-Ber., **220**, (1974) 87.
- 4) 吉本 勇ほか: ねじの締付け管理法の比較, 精密機械, **44**, 2 (1978) 204.