研究論文

弾性域と塑性域ねじ締結のゆるみ特性の比較*

—軸直角繰返し衝撃外力を受ける場合—

大橋 宣俊** 石村 光敏**

On a Comparison of Threaded-fastener Loosening Characteristics
in Elastic and Plastic Region Tightenings

—In Case where a Threaded-fastener is Subjected to Repeated Transverse Impact-force—

Nobutoshi OHASHI and Mitsutoshi ISHIMURA

Taking account of the reuse of bolts and nuts, this paper describes a comparison of threaded-fastener loosening characteristics of bolted joint in the elastic region tightening with those in plastic region tightening and the reason for the difference between them. The experiments are carried out by using the threaded-fastener loosening test machine which applies repeated transverse impact-force. The experimental results are as follows; in the first use of bolts and nuts, the initial loosening in plastic region tightening is larger than that in elastic region tightening, but for the steady loosening the reverse tendency is found. At the reuse in elastic one, both initial and steady loosening are smaller than those in the first use, but in plastic one both loosening are larger than those in the first use. The above mentioned results can be explained by the measurements of bolt end displacement, impact block displacement and twisting torque in the loosening test.

Key words: bolted joint, threaded-fastener loosening, elastic region tightening, plastic region tightening, reusing characteristic

1. 緒 言

従来、ねじ締結はボルトの弾性域内でトルク法によって行われてきた。近年、高い締付け力が得られるとともにそのばらつきを小さくできるなどの利点があるので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結と呼ぶ）が注目されている¹⁾²⁾。しかし、塑性域締結の特性が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に至っていない。

著者らは以前に、塑性域締結したボルトの再締付特性³⁾、及び塑性域締結ボルトの耐疲労特性⁴⁾に関する研究を行い、塑性域締結は弾性域締結より優れていることを確認している。しかし、締結体に外力が作用した場合の締付け力の低下、すなわちゆるみに対しては不安が残されている。

そこで本報では、著者らが試作したボルト軸直角方向繰返し衝撃外力ねじゆるみ試験機⁵⁾を用いて、まず

ボルト・ナットの再使用を考慮に入れ、弾性域と塑性域締結のゆるみ特性の比較を行った。次にボルト軸部に作用するねじりトルク及び各部の変位挙動の測定結果から、ねじのゆるみ機構に関する考察を行い、上述の特性の差について検討した。

2. 実験装置及び実験方法

軸直角方向繰返し衝撃外力ゆるみ試験機の詳細については文献5)で述べられているので、ここではその概略を以下に示す。図1は試験機の主要部と計測システムである。

頭部がロードセルに固定された供試ボルトとナットで締め付けられた衝撃受けにはハンマによって左右交互に一定量の繰返し衝撃外力が与えられる。衝撃受けとベースとの間の下部及び側面には鋼球が配列されており、衝撃受けの摩擦を軽減させるとともに動きが完全に軸直角方向のみに拘束される。締付けトルク T_i はひずみゲージを貼り付けた T 形レンチによって、初期締付軸力 F_i 、ゆるみ試験中の軸力 F 及びボルトのねじりトルク T_s の変化はロードセルで検出される。衝撃受けの変位 S_i 及びボルト先端の変位 S_o は非接

* 原稿受付 昭和60年4月1日。昭和60年度精機学会春季大会学術講演会（昭和60年3月28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 Sectional view of main part in test machine and measuring systems

触電子光学変位計で検出され、デジタルウェーブメモリーコーダを通してペンレコーダで記録される。

本実験に使用する供試ボルトは JIS B 1180 に規定された六角ボルト、M 10、強度区分 8.8 (実耐力 $\sigma_{0.2} = 840 \text{ N/mm}^2$, 実引張強さ $\sigma_B = 940 \text{ N/mm}^2$)、ナットは JIS B 1181 に規定された六角ナット、2 種 (HRC 32, 座面粗さ $R_{\max} = 7 \mu\text{m}$) で、それぞれのねじの等級は 6 g/6 H である。衝撃受けに固定される座面板は HRC 61, $R_{\max} = 1.2 \mu\text{m}$, ボルト穴径は 12 mm である。ねじ及び座部の潤滑には ISO VG 46 のマシン油を用いている。

3. 実験結果

ゆるみ試験に先だち、締付けの際のボルトの弾性域と塑性域の境界を定めるために、図 1 のセット状態で締付試験を行った。図 2 はナットの締付回転角 θ_f に対する締付軸力 F_f 、締付けトルク T_f 及びボルトのねじりトルク T_s の測定結果である。

$\theta_f = 110^\circ$, $F_f = 40 \text{ kN}$ 付近で $\theta_f - F_f$ 曲線の勾配は急変してボルトは塑性域に入る。この結果をもとに以後のゆるみ試験では、 $F_f = 39 \text{ kN}$ を弾性限界締結、それ以下を弾性域締結とする。塑性域締結はトルクレンチで $T_f = 10 \text{ N}\cdot\text{m}$ (スナグトルク) まで締め付け、この点をゼロとしてナット回転角法で $\theta_{fs} = 110^\circ$ (θ_{fs} はスナグトルク点からの締付回転角) 以上の締付けとする。

ゆるみ特性の比較は、初使用及び再使用の 2 種類のボルト・ナットを用いて、弾性域で 3 段階、弾性限界、及び塑性域で 2 段階の合計 12 種類の締結条件につい

Fig. 2 Relation between θ_f and F_f , T_f , T_s

て行った。

図 3 は、初使用ボルト・ナット締結における打撃サイクル (左・右 1 回の打撃を 1 サイクル) n に対する締付軸力 F の変化の記録例である。 $n = 0 \sim 15$ cycle 間で F が急激に低下する初期ゆるみが発生し、その後は n の増加に伴って F はほぼ直線的に低下する定常ゆるみに移行している。

そこで、各種締結条件に対して衝撃エネルギー E_n を段階的に変え、図 3 中に示すように定常ゆるみ中の 1 cycle 当たりの軸力低下率 δ を求める。この δ がゆるみ度合判定の仕切り値 δ' を超えない場合はゆるまない (○), 超える場合はゆるむ (×) として、ステアケース法⁵⁾によって δ が δ' を超えない 50% 確率の

Fig. 3 Examples of n - F curve Fig. 4 Examples of E_{n-cr} by staircase method at 1st use and reuse

限界衝撃エネルギー E_{n-cr} の推定値を求める。ここでは $\delta' = 5$ N/cycle として E_{n-cr} を求め、これによってゆるみを評価する。

図4は、弾性域及び塑性域締結のステアケース法による実験例である。(a)は初使用ボルト・ナットの場合、(b)は(a)で求めた E_{n-cr} (適宜丸めた値) でまず初使用ボルト・ナット締結において200 cycleの打撃を加えた後にゆるめ、再び同じ条件で締め付け、ステアケース法によって試験を行った場合である。図中の δ は各実験における1 cycle当たりの軸力低下率で

Fig. 5 Relation between F_f and E_{n-cr} by staircase method

ある。図5に初期締付軸力 F_f とステアケース法で求めた E_{n-cr} の関係を示す。図中の P_r は再使用のゆるみ試験に先だち初使用ボルト・ナットに対しステアケース法で求めた E_{n-cr} で200 cycleの打撃を加えた際に8組中 δ が $\delta' = 5$ N/cycleを超えなかった割合である。

初使用ボルト・ナットの場合(a)は、弾性限界までは E_{n-cr} が F_f と共に増大し、塑性域に入ると F_f はそれほど増えないにもかかわらず E_{n-cr} は更に大きくなり、ゆるみにくくなることがわかる。再使用の場合(b)は、初使用に比べ弾性域ではゆるみにくく、弾性限界及び $\theta_{fs} = 120^\circ$ では変化なく、 $\theta_{fs} = 150^\circ$ ではゆるみやすくなっている。 P_r はほぼ50%であり、ステアケース法で求めた E_{n-cr} は妥当であることを示している。

図6及び図7は、それぞれ図5のステアケース法の実験における初使用及び再使用ボルト・ナットの E_n に対する初期ゆるみ量 $\Delta F'$ (すべて図3に示すように $n = 0 \sim 50$ cycle間の軸力低下量で定常ゆるみ分も多少含まれている) と δ の関係である。

塑性域締結の $\Delta F'$ は弾性域締結の場合よりはるかに大きい。弾性限界までの締結の場合、再使用の $\Delta F'$ は初使用の約1/2に減少している。各締結条件における E_n - δ の傾向はかなり異なっているが、 E_n と δ の回帰直線(図中の実線)と $\delta = 5$ N/cycleの直線との交点の E_n は図5の E_{n-cr} とはほぼ一致している。

図8は同一ボルト・ナットに対して、締付け→200 cycle外力負荷→ゆるめを1サイクルとして、これを5

Fig. 6 Relation between E_n and $\Delta F'$, δ in 1st use of bolts and nuts Fig. 7 Relation between E_n and $\Delta F'$, δ in reuse of bolts and nuts

回繰り返した場合の $\Delta F'$ 及び δ の変化 (共に初使用 $i=1$ を基準) である。この場合の E_n は、各締結条件で図5における (a) の E_{ncr} の値を用いている。

ボルト・ナットを繰り返し使用すると弾性域と塑性

Fig. 8 Changes of $\Delta F'$ and δ at reuse

域ではゆるみ特性は明らかに異なり、弾性域では初期ゆるみ、定常ゆるみ両方とも使用回数と共に小さくなるのに対し塑性域では逆の傾向を示している。なお、塑性域の再締付条件は初使用の場合と同じであるために、接触部のなじみとボルトの加工硬化によって初期締付軸力 F_f は、 $\theta_{fs}=120^\circ, 150^\circ$ とともに2回目で約3%、4回目で最大になり約6% 初締付けのときより増大している。

4. 考 察

4.1 初期ゆるみ

図9は、初使用ボルト・ナットの締付過程及びゆるみ試験中のボルト軸部に作用するねじりトルク T_s -軸力 F のX-Yレコーダによる記録例である。高速現象はレコーダが追従できずカットされ、ボルトの中立状態 (ボルトに曲げが作用していない状態) だけが正確な値として現れている。 T_{ss} は締付終了直前、 T_{s0} はレンチを外した状態の T_s の値、 n は打撃のサイクル数である。

締付終了直前での締付けトルク及び座部トルクをそれぞれ T_{fs} 及び T_{ws} とすれば $T_{fs}=T_{ss}+T_{ws}$ の関係

Fig. 9 Relation between T_s and F

が成り立っている。レンチを外した瞬間には、図2より $T_{ss} < T_{ws}$ であり(図2の T_f 及び T_s は、それぞれ T_{fs} 及び T_{ss} に相当する)、また図9で F に変化がない。従って、ねじ面及び座面では相対すべりは生じず、 T_{s0} はボルト系のねじりばね定数 Γ_b と被締結系のねじりばね定数 Γ_c を用いて次式⁶⁾の関係になると考えられる。

$$T_{s0} = -T_{w0} = T_{ss} - \frac{\Gamma_b}{\Gamma_b + \Gamma_c} T_{fs} \quad (1)$$

ただし、 T_{w0} は締付終了時の座部トルクである。

上述の状態に衝撃外力が作用すると、ボルトはたわむのと同時にボルトの弾性ねじれの回復と接触部のなじみが進行して、 T_{s0} はねじのリード角 β による F のトルク成分とねじ部の摩擦係数 μ_s による次式の T_s にほぼ落ち着くと思われる。

$$T_s = F \frac{d_2}{2} (\tan \beta - \mu_s / \cos \alpha') = -T_w \quad (2)$$

ただし、 d_2 : ねじの有効径、 α' : ねじ山直角断面における山の半角。

図9中の一点鎖線は式(2)において μ_s を極限のゼロとした場合、すなわち β と F による軸回りのトルク成分の計算値である。ボルトの中立状態における T_s は弾性域、塑性域締結のいずれとも初期ゆるみ完了後では一点鎖線の計算値に近い値を示している。従って、初期ゆるみは $\mu_s = 0$ とおいた式(2)の関係が成り立つまで続くと考えられる。

塑性域締結の場合は、締付終了時にボルト遊びねじ部は塑性域の状態にあるので、これに曲げが追加されると永久伸びが進行し、弾性域締結の場合よりも初期ゆるみ量 $\Delta F'$ は大きくなると考えられる。弾性域の再使用では、初使用時に接触表面の微小な凹凸が平坦化され、接触状態が良くなっているため $\Delta F'$ が小さくな

Fig. 10 Examples of bolt end displacement S_b , impact block displacement S_i and twisting torque T_s

ると考えられる。

4.2 定常ゆるみ

図10は、定常ゆるみ中の1回の打撃における衝撃受けの変位 S_i 、ボルト先端(ナット頂面から1.5 mm)の軸直角方向変位 S_b 及びねじりトルク T_s^* の波形の記録例である。

低い締付軸力の場合(a)では、ボルトがナット内で

* ボルトの軸部にひずみゲージを貼付して検出しているため曲げによる干渉が含まれている。

Fig. 11 Relation between F_f and δ , F and S

傾くことによって S_i と S_b にわずかな差を生じながら変位し、 S_b の勾配が変化する S_s 付近でナット座面と座面板間で軸直角方向すべりが発生すると推測される。 S_{imax} 付近で $(S_i - S_b)$ が最大になり、その後は $(S_i - S_b)$ にわずかな変動を生じながら減衰振動に移行している。 T_s は S_s 点付近から減少し始まり、 S_{imax} 点付近でゼロになり、その後再び上昇している。一方、高い締付軸力の場合 (b) 及び塑性域締結の場合 (c) の S_i と S_b は、 S_{imax} 及び減衰振動のピーク付近でわずかな差があるが $(S_i - S_b)$ を生じている。 T_s の挙動は曲げによる干渉が大きいので明らかでないが、(a) の場合のように T_s はゼロになることはないかと判断できる。

図 11 は、 F_f と δ の関係及び F と S_{imax} 、 S_{bmax} の関係である。最大変位量に差 ($S_{imax} - S_{bmax}$) がある場合はその量に、差がない場合は ($S_{imax} = S_{bmax}$) の量におおよそ比例して δ は大きい。しかし差がある場合の δ は、ない場合よりはるかに大きい。

以上の実験結果から、定常ゆるみの発生機構と δ の大きさは以下のように推察される。

初期ゆるみが終了するとボルトは中立状態で $\mu_s \approx 0$ とおいた式 (2) の関係を保って停止している。衝撃外力によって衝撃受けとボルトが変位振動している過程でナット座面に軸直角方向のすべりが発生 (例えば、図 10 の S_s 点付近) すると円周方向の摩擦力が低下

Fig. 12 Relation between S_i and W

し、ナットはボルトと共に T_s によってゆるみ方向に回転する。軸直角方向すべりが終了 (図 10 の S_{imax} 付近) するとナットは静止するが、ボルトはねじ面ですべりが発生しナットのリードを下る方向にねじれ、 $\mu_s \approx 0$ とおいた式 (2) の状態になり、この間で軸力の低下が発生する。試験中に座面のすべりとねじ面のすべりが交互に繰り返されることによってゆるみが進行すると推察される。

従って、ナット座面の軸直角方向の摩擦力は $\mu_w F$ なので、一定の衝撃外力に対し、締付軸力 F が大きいほど $(S_i - S_b)$ は小さくなるのでナットのゆるみ方向回転量及び δ も小さくなると思われる。塑性域締結では、締付け時にボルトの遊びねじ部が塑性変形することによって座面の接触が均一化され、 S_i 、 S_b のピーク付近の $(S_i - S_b)$ が弾性域の高い締付軸力の場合より小さくなり δ も小さくなると考えられる。

弾性域の繰返し使用では、ねじ面及び座面の接触状態が均一化されるのでゆるみにくくなるが、 $\theta_{fs} = 150^\circ$ のような塑性域にかなり入った繰返し使用で、また大きな外力が負荷される場合には、初期ゆるみの継続で曲げによる永久伸びが進行するので軸力の低下が大きくなるものと考えられる。

図 12 は、衝撃受けを静的な外力 W によって変位させた場合の $W-S_i$ 曲線であり、曲線の頂点で座面間の相対すべりが発生し始める。図 13 は、 F とすべりが発

Fig. 13 Relation between F and S_s .

生し始める変位 S_s (衝撃外力の場合は図 10 の S_s 点) の関係であるが、 S_s は衝撃と静的な外力で違いはない。これより、大きな座面間すべりの発生は、 E_n の大きさ及び負荷速度には影響されないことが分かる。従って、図 11 に示されているように S_{imax} と S_{bmax} に明りょうな差が生じ、 δ が大きなゆるみ(ここでは $\delta > 10$ N/cycle)は静的問題として取り扱うことができる。しかし S_{imax} と S_{bmax} に差がなく δ が小さなゆるみに対しては、外力負荷速度と接触部の状態を考慮する必要がある。

5. 結 言

本研究で得られた主な結論は以下のとおりである。

- (1) 初使用ボルト・ナットの塑性域締結は、弾性域締結に比べ初期ゆるみは大きい、その後はゆる

みにくい傾向を示す。

- (2) 再使用では初使用に比べ、初期ゆるみ、定常ゆるみ両方とも弾性域締結では小さく、塑性域締結では大きくなる。
- (3) ゆるみ試験中の衝撃受けの変位、ボルト先端の軸直角方向変位及びねじりトルクの測定結果から上述の (1) の傾向を説明することができる。

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。本研究に御協力と御教授を賜りました東京工業大学精密工学研究所の吉本勇教授を始め多くの方々に感謝の意を表します。

文 献

- 1) G. H. Junker u. J. P. Boys: Moderne Steuerungsmethoden für das motorische Anziehen von Schraubenverbindungen, VDI-Ber., 220, (1974) 87.
- 2) 吉本 勇, 丸山一男, 長谷川晴美: ねじ締付管理方法の比較, 精密機械, 44, 2 (1978) 204.
- 3) 大橋宣俊, 石村光敏: 塑性域締付けにおけるボルトの再使用特性, 精密機械, 50, 10 (1984) 1607.
- 4) 大橋宣俊, 萩原正弥, 吉本 勇: 塑性域ねじ締結の特性——締付軸力のばらつきと耐疲労特性, 精密機械, 51, 7 (1985) 1383.
- 5) 大橋宣俊, 石村光敏: 軸直角方向繰返し衝撃外力によるねじのゆるみ試験, 精密機械, 51, 6 (1985) 1264.
- 6) 萩原正弥: 締付終了後のねじ部トルクの挙動, 精密機械, 50, 8 (1984) 1277.

(p.1173 より続く)

今回の通産省主導型による CAD/CAM 業界の組織化は、これまでの動きを踏まえたうえで CAD/CAM システムの標準化を策定し、システム普及の円滑化を図るために業界の体制を確立しようというものである。

具体的には CAD 用語やインタフェース関連事項, CAD システムの機能評価, CAD 製図方法, ハードウェアの互換性, 出力機器など周辺機器操作コマンド, データの互換性などを抽出, 標準化のための調査, 研究を進める一方, 海外の実態調査や各システムの相互比較, ソフトの調査・分析などを行う計画である。特に CAD 分野

の標準化については, ISO(国際標準化機構)/TC 184(産業オートメーションシステム)の SC 4(製品モデル表現)でも, CAD システム間の交換を目的とした CAD 言語「STEP」の仕様などの標準化作業が進められているが, こうした国際的取組みに対しても積極的な協調を図っていく意向でいる。

計画では CAD 標準化懇談会を設けるなど, 国際ロボット・FA 技術センターを窓口として業界の結束を図る方針である。

(服部 敏夫)