研究論文

巨視的座面すべりがない場合の ねじのゆるみ挙動*

——軸直角方向繰返し外力下のゆるみ機構——

賀 勢 晋 司** 石 村 光 敏*** 大 橋 宣 俊***

On Self-loosening of Threaded Joints in the Case of Absence
of Macroscopic Bearing-surface Sliding
—Loosening Mechanism under Transversely Repeated Force—

Shinji KASEI, Mitutoshi ISHIMURA and Nobutoshi OHASHI

It is considered that the self-loosening with returning rotation of screw thread can occur in threaded joints under transversely repeated force even when the macroscopic slide is absent on the bearing surface. The above loosening can be expected to be relatively small, but should be noticed because it can become to be a start toward a serious loss of fastening force. This paper presents an approximate solution for the loosening mechanism in this case. An elastic torsion of bolt-shank produced in the relative movement between mating threads and a moment endurable on the bearing surface being regarded as basic factors of loosening, a theoretical consideration is prompted. Especially paying attention to behavior of the above elastic torsion and the loss of fastening force, an experimental examination of the theory is performed in a static condition. Consequently, it is shown that a basic appearance of loosening may be explained fairly well by the theory.

Key words: threaded joints, self-loosening, small transverse force, elastic torsion, surface sliding, loosening mechanism

1. 緒 言

ねじ締結の信頼性向上において、ゆるみは大変重要な課題である。ゆるみには種々の形があるが、一般に、戻り回転を伴い、ボルト軸直角方向の外力の繰返しによる場合が最も危険なことが知られている。本研究もこの場合を対象とする。

戻り回転を伴うゆるみはボルトまたはナット座面のすべりがあって初めて現実のものとなる。従来は、このすべりが巨視的で明白な場合についてゆるみ機構の検討が行われた¹⁾²⁾。しかし、外力が小さくてすべりが認められない場合や微小な場合のねじの挙動にもゆるみに直結する要因があると思われる。通常、この場合こそゆるみの初期段階で、明らかな座面すべりと大きな軸力低下に至らせる重要段階ではないかと考えられ

る。

本研究では上述の観点から検討を進め、ねじのゆるみ機構をより明らかにすることを目的とする。

2. 理論的考察

2.1 ゆるみ機構の考え方

山本、著者の一人による研究¹⁾²⁾から、ゆるみの内部的な原因はねじ部の相対変位に伴いボルト軸に生じるリードを下る方向の弾性ねじれであるという考え方をとる。この弾性ねじれは締付けやその後の履歴にも関連するので、以下のように二つの場合に分けて考察する。図1に概略の説明を示す。なお、被締付け物どうしの接合面には相対すべりがあるものとする。これがなければ、ここでのゆるみは生じないからである。

(a) 弾性ねじれ u が始めゼロか小さい場合 (図1, ①, ①', ①'') 外力の繰返しに伴い u は蓄積し³⁾、ボルトねじ山はリードを下っていく。 u によりボルト軸には反作用モーメント T が生じる。 u には力学的な限界値 u_{cr} があり、戻り回転防止

* 原稿受付 昭和62年10月27日。昭和62年度精密工学会秋季大会学術講演会(昭和62年10月12日)にて発表

** 正 会 員 信州大学工学部(長野市若里500)

*** 正 会 員 相模工業大学(藤沢市辻堂西海岸1-1-25)

Fig. 1 Schematic explanation of self-loosening mechanism

能力を表す座面保持トルク M_b の上限値 M_{bu} が u_{cr} による T_{cr} より小なら、 $T = M_{bu}$ の時点で座面が $T = M_{bl}$ (M_b の下限値) まですべり、外力の繰返し下で増そうとする u の解放とそれに対応するゆるみを生じる*。 u はまた増そうとし、同条件なら上述の挙動が繰り返され、ゆるみが進む。

(b) u が始め比較的大きく残留している場合 (図 1, ②, ②', ②'') 外力の繰返しに伴い u の解放が、ねじ面、座面で進む。 $M_{bu} > T_{cr}$ なら、 u は u_{cr} に落ち着き、ゆるみはない。 $M_{bu} < T_{cr}$ なら、上述 (a) と同様にゆるみが進む。

図 1 において ①'', ②'' はゆるみが生じる場合を示し、ジグザグ線はそれが次々に進む様子を概略的に表す。まとめれば、ゆるみが生じる条件は、

$$M_{bu} < T_{cr} \quad (1)$$

ただし、①' のように u が低い値で拘束され、 $T < M_{bu}$ ならばその限りではない。

2.2 外力と変位の関係

図 2 はボルト軸のたわみの関係を示す。O はナット高さ中央点を示し、 W は軸直角外力、 M はナットねじ面よりの抵抗モーメント、 k は固定部 (ここではボルト頭部) の傾き定数である。点 O におけるたわみ v 、傾き i の関係式は、

$$W = c_v v + c_m M \quad (2)$$

* リード下り方向に u が変化すると、おねじはめねじに対しゆるみ方向にねじれ回転変位する。この場合、 T に負ける座面は戻り回転し、ゆるみが現れる¹⁾。

Fig. 2 Deflection of bolt-shank

Fig. 3 Relation between W and v

ただし、

$$c_v = 1 / \left[\frac{1}{3E} \left\{ \frac{l_p^3}{I_p} + \frac{l_c(3l_p l_c + l_c^2)}{I_c} \right\} + k l^2 \right]$$

$$c_m = \left[\frac{1}{2E} \left\{ \frac{l_p^2}{I_p} + \frac{l_c(2l_p + l_c)}{I_c} \right\} + k l \right] c_v$$

$$i = \frac{1}{E I_p} \left(\frac{l^2 W}{2} - l M \right) + \frac{l_c}{E} \left\{ \left(l - \frac{l_c}{2} \right) W - M \right\} \times \left(\frac{1}{l_c} - \frac{1}{I_p} \right) + k (l W - M) \quad (3)$$

ここで、 E は縦弾性係数、 I_p 、 I_c は断面二次モーメント、 d_p 、 d_c は直径、 l 、 l_p 、 l_c は長さである。なお、添字 p はねじ部、 c は円筒部を示す。

図 3 に座面すべりがない場合の W と v のサイクル図形を二つのタイプで示す。式 (2) はこの W と v の関係を表す。 u が生じ、ゆるみの恐れがある場合にはねじ面すべりにより図形にヒステリシスがあるはずであり、タイプ I はねじ面のすべりが生じ難い場合、II は生じやすい場合に対応させている。図 4 に比較のた

Fig. 4 Experimental diagram between W and v
(Init. fastening force; 9.8 kN)

め実測図形の例を示す。二つのタイプが見分けられる。図3において実際には、IとIIは独立ではなく、場合に応じてI→II、II→Iの変化を示すことが考えられる。

タイプIの場合、ねじ面での動きを把握し難いこと、ゆるみに対してはIIの場合がより危険と考えられることから、以下の考察ではタイプIIの場合を取り上げる。

タイプIIについて、簡単のため、破線で示すabcdをサイクル図形としてモデル化する。bc(da)部はねじ面すべりの過程、cd(ab)部は M の方向が反転する遷移過程となる。 M を次式で表す¹⁾。

$$M = \frac{L}{4} \frac{\mu_s F_t}{\cos^2 \alpha} \quad (4)$$

ここで、 L はナット高さ、 F_t はボルト軸力、 μ_s はねじ面摩擦係数、 α はねじ山半角である。

2.3 ボルト軸のねじれ挙動の計算

図3において、開始点 s から考えてねじ面すべりまで至らないなら(常に $v < v_t$, $W < W_0$)、 u に新たな変化を与えないため、2.1項におけるような考察をするまでもなく、ゆるみの発生のない場合となる。実際には点 f 近傍でなだらかな移行過程を示すが(図4)、sfを直線近似して W_0 と v_t を求める。この場合、ねじ面すべりがないので、sf部では傾き i は M に比例すると考えられる。ここでの M を M_0 と置けば、 $i = k_0 M_0$ (k_0 は定数)、式(3)を用いれば、 $M_0 = a_w W$ (a_w は係数)が得られ、 W_0 は式(4)を考慮に入れて、

$$W_0 = L \mu_s F_t / (4 a_w \cos^2 \alpha) \quad (5)$$

ただし、

$$a_w = \frac{\frac{(l-l_c)^2}{2EI_p} + \frac{(2l-l_c)l_c}{2EI_c} + kl}{\frac{(l-l_c)}{EI_p} + \frac{l_c}{EI_c} + k + k_0}$$

v_t は式(2)、(5)を用いて、

$$v_t = (1 - c_m a_w) W_0 / c_v \quad (6)$$

なお、ここで $k_0 = 0$ と簡単化すれば、 W_0 , v_t はより安全側となる。

W が W_0 より大になれば、ねじ面すべりがあるので u の変化がある。この挙動の一般的な捕捉は難しいが、座面すべりはないとして、図3のabcdに対し山本らのねじ面におけるすべり軌跡の考え方¹⁾を適用して近似的解析を行う。

u を有効径円周に沿ってとると(リード下り方向を正)、ナットねじ面上におけるボルトねじ面のすべり軌跡の方程式は近似的に、

$$\frac{dr}{du} = \frac{\mu_s F_t}{F_t \sin \beta - u K_u} \quad (7)$$

ただし、 r はナットに対するボルトねじ面の半径方向の動き、 β はリード角、 K_u は有効径円周上で考えたねじりばね定数である。

F_t のサイクル中の変化は小だから、 F_t を一定とし、 u の初期値を u_0 とすれば、式(7)の解は、

$$u = F_t \{1 - \exp(-\omega_1 r)\} \sin \beta / K_u + u_0 \cdot \exp(-\omega_1 r) \quad (8)$$

ここで、 $\omega_1 = K_u / (\mu_s F_t)$, $r = L(i - i_0)/4$, i_0 は $u = u_0$ の時の i である。

図3で $s \rightarrow c \rightarrow \textcircled{A} \rightarrow a \rightarrow \textcircled{B} \rightarrow c \rightarrow \dots$ の順に各区間ごとに式(8)、(3)を適用すれば、 u の挙動が計算できる。また、図1の u_{cr} , T_{cr} は式(7)の分母をゼロと置けば求まる。 d_p を有効径とすれば、

$$u_{cr} = F_t \sin \beta / K_u, \quad T_{cr} = d_p u_{cr} K_u / 2 \quad (9)$$

3. 実験及び考察

3.1 実験装置と実験条件

図5に実験装置の外観、図6に締結部の断面を示す。供試ボルト①は軸力用ロードセル⑧の内側に固定具⑩で頭部を保持される。頭部の固定は不確定要因を除き、条件を同一化するためである⁴⁾。多数の鋼球⑥により接合面を転がり接触として減摩し、可動板④をナット②によって本体Vベース⑦に締め付ける。可動板は十分に調整された上下のボールガイド⑤により、ボルト軸直角方向の動きのみに拘束され、油圧で静的な動きを与えられる。シリンダ⑫は複動形で、変位調整のためポンプを四方バルブ⑬付手動型とし、流量制御弁⑭がつく。可動板の変位は電気マイクロメータ⑮で検出される。なお、⑪は外力用ロードセルで、自動調心軸受を通じピストンロッドとピン結合している。また、装置の要部には熱処理を施している。

Fig. 5 General view of experimental apparatus

Fig. 6 Sectional view of main part

ボルトのねじれ量は、軸先端に取り付けた円板⑬に電気マイクロメータの一対の検出子⑭、⑭'をあて拡大(約10倍)して測定される。

表1に実験条件を示す。ボルトは強度区分8.8、ナットは両側面取りで熱処理されている。潤滑油の μ_s は実験装置上での締付実験によるもので、 K_u はボルトに関する計算値である。 k は実験装置上での外力付加によるボルトのたわみ実験から求めた。

ナット座面に巨視的すべりを与えないため、 W と v 関係の実験(図4参照)及び試行に基づき、 v_2-v_1 はマシン油、 MoS_2 潤滑において各々0.3, 0.1 mm以内を目安とする。

3.2 実験結果と考察

Table 1 Experimental conditions

Bolt-nut	M 10, $L=10$, $l_t=28$, $l=33$, $l_c=12.4$, $l_p=20.6$, $d_c=9.9$, $d_p=9.03$ mm
Lubricant	120 machine oil ($\mu_s=0.13$), MoS_2 +spindle oil ($\mu_s=0.08$)
Torsional stiffness	$K_u=7.74 \times 10^4$ N/mm
Coeff. of tilt	$k=8.6 \times 10^{-8}$ (1/N·mm)
Initial fastening force	$F_{t1}=9.8$ kN

ボルト軸の有効径円周上の弾性ねじれ u と軸力 F_t の変化に注目する。

図7にサイクル内の u と v の関係の実験記録例を示す。要所に図3に対応した記号を付す。

(a), (b)は各々マシン油, MoS_2 潤滑の場合で、2.1項に対応して締付けによるボルト軸のねじれ u_s を残した場合(初期ねじれ残留)とそれを意図的に除いた場合(初期ねじれ解除)を含む。 $n=1$ で u は大きく変化しているが、その大部分は2章での予見通りねじ部すべり過程と見られる $s \rightarrow c$, ④ $\rightarrow$ aで生じる。(a1), (a2)の $n=2, 3$ 以降ではサイクル中の前半で u の増、後半で減が限界値付近であるが、ゆるみがない(後述図10)ことから、この変動はねじ面にお

Fig. 7 Behaviors of torsion of bolt-shank

Fig. 8 Changes of quantity of torsion of bolt-shank (Lub.: machine oil)

 Fig. 9 Changes of quantity of torsion of bolt-shank (Lub.: MoS₂)

るすべりによるものと考えられる。(b1)は $n=1$ のサイクル前半で u の解放、後半でいったん増加後解放の様子を示し、以降半サイクルごとに同様な特徴的増・減を繰り返している。(b2)の場合は $n=2$ 以降わずかな変動幅しかないが、(b1)と同様に、 u は低レベルで、微小な座面すべりの存在を予想させる。

図8,9はサイクルごとの点⑧(図3)について、各々マシン油、MoS₂潤滑の場合の u のサイクル数 n に対する変化の実験及び理論値を示す。図10は各場合の軸力低下 ΔF_t の実験値を示す。いずれも初期ねじれを残留と解除の場合を含み、変位 v_2-v_1 を変えている。図8,9の理論値は、各場合の式(2)による W_1 の計算値が式(5)で $k_0=0$ として求めた

W_0 より大となる場合のみについて示されている。それ以外は2.3項で考察した図3のタイプIIには対応しないと考えられるからである。ちなみに、上の W_0 の値は図8で234 N、図9で144 Nである。なお、すべての実験値は3,4回の平均を表し、図8,9にはねじれトルク $T(=d_0 u K_u/2)$ のスケールも付す。

マシン油潤滑の場合、図1の①,①',②,②'に対応し、ゆるみも認められない。 F_t の多少の変化は初期のものであり、この程度は微妙なはめ合い変動のためと考えられる。変位0.1, 0.2 mmの場合には限界値を含めて u の実験値は理論値とかなりよく合う。30, 50 μm の場合はねじ面すべりが生じ難く、図3のタイプIまたは更にヒステリシスが小さくなった状態と推測できる。0.1, 0.2 mmの場合を見ると、特に u は急速に限界値に達している。このような挙動を考えると、時によって式(1)が成立する恐れもあるからゆるみの危険は常に存在すると思われる。

MoS₂潤滑の場合、様子は異なる。 u の最大値もまちまちで小さく、変位50 μm についても座面すべりがないとした理論値とも合わない。図10によれば、15 μm の場合以外はゆるみが進んでいる。座面の回転防止能力は低く、この程度の変位でも微小な座面すべりの発生が推測される。 u はそれによる解放分だけ低レベルであり、式(1)が示すゆるみ状態にあると見られる。30, 50 μm の場合は図1の①',②'の対応例とみなせ、図7(b)は u の挙動を例示している。特に(b1)に明りょうな特徴がとらえられている。なお、初期ねじれ残留、解除の条件の間で u のレベル、ゆるみ量にかなりの違いが見える。座面の回転防止能力を表す M_{bu} , M_{b1} の大きさや差の特性の複雑さの影響と思われる。

以上の結果、本論文の考え方はゆるみの発生の基本

Fig. 10 Experimental values of loss of fastening force

を大筋で明らかにしていると思われる。座面の動向や戻り回転の実測による把握を含めた細部の検討、動的状态での研究が今後の課題である。

4. 結 言

- (1) ねじ締結に軸直角方向の繰返し外力が作用する場合、座面に巨視的すべりが無い場合のねじの挙動がゆるみに対して重要と考え、ゆるみ機構の考え方とゆるみ条件を示した。
- (2) その際、ボルト軸の弾性ねじれ挙動にゆるみの内部的要因があるとして近似的解析を行った。
- (3) 静的な実験装置を作り、特に上述の弾性ねじれに注目した実験により、ゆるみ機構の考え方を大筋で実証した。

最後に、本研究に卒研学生（信州大）としてご協力頂いた平川達司君（ミノルタカメラ）、実験装置の製作にご助力頂いた堤信一技官（信州大、工）に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 山本 晃，賀勢晋司：軸直角振動によるねじのゆるみに関する研究——ゆるみ機構の解明，精密機械，**43**，4（1977）470。
- 2) 山本 晃，賀勢晋司，久保輝芳：軸直角振動によるねじのゆるみに関する研究——ゆるみ止め性能曲線の理論化，精密機械，**43**，9（1977）1069。
- 3) 山本 晃：日本ねじ研究協会中間報告資料（1973.9）（未公表）。
- 4) 山本 晃，賀勢晋司：軸直角振動によるねじのゆるみに関する研究——ゆるみ止め性能の表し方と各種ゆるみ止め装置の評価，精密機械，**42**，6（臨時増刊）（1976）507。

会 報

昭和63年度第1回理事会議事

日時 昭和63年4月15日（金），17時30分～20時

場所 セラミックスビル会議室

- 議事
1. 昭和63年度期会長所信（理事会の運営方針）
 2. 昭和63年度期理事職務分担の件
 3. 昭和63年度理事会および総務委員会の開催日程の件

4. 昭和63年度各部会・委員会委員委嘱の件
5. 昭和63年度に設置を予定される委員会に関する件
6. 広報委員会に関する件
7. 昭和63年度支部補助金の件
8. 欧文誌に関する件
9. その他

* * *

編 集 後 記

“材料を制するものは、技術を制する”とよく言われています。しかしながら新しい材料が開発され、それが世に出まわるには、10年ないし15年程度のタイムラグが必要なようです。たとえばアメリカのGE社が、立方晶窒化ほう素砥粒を“ボラゾン”という商品名で市販を開始したのは1969年です。現在はCBN砥粒あるいはホイールは非常にポピュラーなものとなっていますが、それまでに約15年程度の年月が経たことになります。

CBNホイールの場合、一般の研削砥石と比較し、価格が高かったため、人件費が高騰し、トータルコスト的にみて有利となるような条件が必要とされたことも原因でしょう。またCBN砥粒に適した研削盤が開発され、そしてCBNホイールの選択の仕方およびツルーイング、ドレッシング等の使用上のノウハウの確立に長い年月が必要であったのかも知れません。

すなわちこのことは、新しい材料あるいは原理が開発され、それが世に出るには、周辺技術の成熟を待たねばならないことを示すものです。

今回、本特集号でとりあげたファインセラミックスにつ

いても、同様のことが言えるのではないのでしょうか。このたびは精密機器材料としてのファインセラミックスを応用事例を中心に検討しようと考えました。しかしながら“ファインセラミックス、ファインセラミックス”と騒がれているわりには、応用事例が少ないのです。このことはファインセラミックスを使いこなす上での周辺技術が未成熟なことを示すものでしょう。

鋼を中心とした時代が非常に長く続いているので、その設計技術、加工技術および評価技術に関するデータは非常に豊富にそろっていますが、それと比較したら、セラミックスに関してはほとんどないと言っても過言ではありません。そのためセラミックスに関しては、これからどんどんデータを蓄積する必要があります。本特集号は、その意味において、これからの指針となるものです。“ニワトリが先か、卵が先か”の議論はありますが、新石器時代はまだ幕があいたばかりなので、ファインセラミックスを、ぜひとも、長い目で見守ってほしいものです。

なお、本号より「私の主張」欄を新設する予定でしたが、1号ずらして次号から開始することになりました。会告ページをご覧のうえふるってご投稿下さい。

（海野邦昭）