軸直角衝撃によるねじのゆるみ試験*

——接合面および被締付部材の剛性の影響——

萩原正弥** 大橋宣俊*** 西山信夫† 渡辺春幸†† 吉本 勇†††

Self-loosening Test of Threaded Fasteners by Transverse Impact
—Effects of Contact Condition and Rigidity of Clamped Parts—

Masaya HAGIWARA, Nobutoshi OHASHI, Nobuo NISHIYAMA,
Haruyuki WATANABE and Isamu YOSHIMOTO

In transverse impact self-loosening tests for threaded fasteners, rolling contact condition and flexible tension-type load cell have been used instead of metal-to-metal contact condition and relatively rigid clamped parts, respectively. So it is required to consider the effects of above-mentioned differences between test and practice in order to utilize the results from conventional tests in mechanical design. This paper aims to clarify the effects of contact condition and of rigidity of clamped parts (or load cell). The testing machine is developed in which contact plane with rolling contact condition and tension-type load cell can be easily replaced by metal-to-metal contact condition and newly developed rigid compression-type load cell, respectively. Averaged preload loss per cycle in steady-state region is selected as an index to evaluate the self-loosening characteristic. The following results are obtained in this study: (1) The critical impact energy at the self-loosening limit is considerably dependent on the contact condition. (2) If the data are arranged by maximum displacement of the plate subjected to impact, the self-loosening characteristics are hardly affected by testing conditions.

Key words: threaded fastener, self-loosening test, transverse impact, testing condition, self-loosening characteristic

1. 結 言

ねじ締結体におけるねじ部品のゆるみは、締結機能が喪失するまで進行しなくてもボルトの疲労破壊の危険性を増大させる場合が多いため、種々の方法によるゆるみ試験によって、ゆるみ特性の適切な評価やゆるみ機構の解明を図ろうとする試みが行われている¹⁾。しかしこれらの試験では、通常、締付け力を検出するために被締付部材（ロードセル）の軸方向の剛性がかなり低く、更に軸直角方向負荷の場合^{2)~5)}には接合面に鋼球を挟むなど、締結の状態が実際とかなり異なっており、このような方法による試験結果から実際のねじ締結体のゆるみ挙動を評価できるかどうかを検討しておく必要がある。

そこで本研究では、軸直角方向衝撃負荷の場合を例に、接合面の状態および被締付部材の剛性（ばね定数）がゆるみ特性に及ぼす影響を調べるために、これらの因子を大きく変化させたゆるみ試験を行い、更にゆるみ特性に対する評価因子に関して検討を行っている。

2. ゆるみ試験機

図1に本研究で試作した軸直角方向繰返し衝撃ゆるみ試験機の概観を示す。本試験機は、電動機、一對のハンマおよびハンマ軸より構成される衝撃負荷部、衝撃受板、ローラガイド、試験用ボルト・ナットなどから構成される締結部（詳細は3章参照）、並びに、ハンマのシーケンス動作を制御する制御部から成っている。

図2にハンマ軸系の構造を示す。左右のハンマ軸は平歯車で連結されており、平歯車とハンマ軸、およびハンマ軸と試験機本体の間に取り付けられた電磁クラッチおよび電磁ブレーキの開閉を制御することによって、ハンマの振上げ、停止、および開放（自由落下）の順序動作を左右交互に繰り返す。ハンマの振上

* 原稿受付 昭和62年2月18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 名古屋工業大学（名古屋市昭和区御器所町）

*** 正 会 員 相模工業大学（藤沢市辻堂西海岸 1-1-25）

† （株）名古屋螺子製作所（関市新迫間 81-1）

†† 正 会 員 （株）名古屋螺子製作所

††† 正 会 員 拓殖大学工学部（八王子市館町 815-1）

Fig. 1 Newly developed self-loosening testing machine by transverse impacts

Fig. 2 Setup of hammer spindle system

げ角度の設定および位置の検出には軸の一端に取り付けた角度割出板およびフォトセンサを用いており、片側のハンマによる連続した衝突を防ぐため、衝撃負荷後の反動によるハンマの上昇を検出した時点でハンマの振上げを開始する。

ゆるみ試験中の衝撃受板の変位および締付け力の値は、それぞれ、渦電流式変位センサおよびひずみゲージ式ロードセルによって検出しており、衝撃負荷の繰返し数は、一定回転ごとのパルス出力のほか、操作盤上の表示部に発光ダイオードセグメントによって表示される。

3. ゆるみ試験方法

剛性の低い引張型ロードセルおよび鋼球を用いる従来の試験方法（以下、試験方法 A と呼ぶ）と、

剛性の高い圧縮型ロードセルおよび実際の状態に近い接合面の組合せを用いる新しい試験方法（以下、試験方法 B と呼ぶ）によるゆるみ特性の比較を行う。ゆるみ試験に用いたボルト・ナットの呼びは M 10、強度区分はそれぞれ 8.8（転造後熱処理）および 8（熱処理後タッピング）で、締付けに際しては、ボルト頭部を固定しナット座面およびねじ面にマシン油（ISO VG 46 相当）を塗布している。また、それぞれの試験では、衝撃によってモーメント外力が作用しないように、ローラガイドを用いて衝撃受板の回転方向の動きを拘束している。

3.1 試験方法 A

図 3 に試験方法 A の構成を示す。上部板（衝撃受板）と下部板（締結板）の間には 2 枚のボールガイドを介して鋼球が挟まれており、これによって接合面の摩擦の影響を低減させる機構になっている。ロードセルは、感度を増加させるため（本実験では 41.7×10^{-6} ひずみ/kN）、円筒部（検出部）の肉厚が薄く、締結部全体の軸方向の剛性は実際のねじ締結体に比べてかなり低くなる。図 3 の締結部に対して実験によって求めたばね定数 K_c （実際のねじ締結体における被締付部材の圧縮ばね定数に対応）は $201 \text{ N}/\mu\text{m}$ であり、この値はボルト・ナット系の引張りばね定数と同程度の値である。なお、ロードセルは試験機本体（ベース）に固定されており、締付けの際の衝撃受板の位置決めにはノックピンを用いている。

3.2 試験方法 B

図 4 に試験方法 B の構成を示す。試験方法 B では、鋼球の代わりに金属面接触の接合面（ただし、焼付き防止のため、 MoS_2 ペーストを塗布）を用いており、ま

Fig. 3 Experimental setup for method A

Fig. 4 Experimental setup for method B

た剛性の低い引張型ロードセルの代わりに、新たに考案した圧縮型ロードセルを用いている。

圧縮型ロードセルは、図5(a)に示すようにボルト穴近傍に4本のパイプ形ひずみゲージ（昭和測器製P11-FA-3-120-11）を埋め込んだもので、締付け力によってボルト穴近傍に生じる比較的大きなひずみを検出する構造になっている。また、それぞれのゲージは、図5(b)に示すように、ボルト座面の傾き（直角度誤差）によるひずみを補正するようにブリッジが組まれている。締付け力 F_f とひずみ ε の関係は、図6に示すように、良い直線性を示しており、また試験方法A（図3）に比べ締結部全体の剛性（ばね定数）が7倍以上*に増加しているにもかかわらず、試験方法Aの場合の40%程度の出力感度を確保している。ただし、この方法ではゲージ位置に発生するひずみは、ボルト頭部座面の接触面積に依存するため、座面の寸法あるいは形状の異なる試験片に対してはその都度、校正を行う必要がある。なお図6の破線は、締付け力 F_f による圧力がRötscherの影響円

Fig. 6 Calibration curve for compression-type load cell

Fig. 7 Assumed stress distribution at gage location

すい⁶⁾内に線形分布（図7）すると仮定して求めた計算値で、その値はほぼ実験値と対応している。

3.3 ゆるみ特性の評価

予備実験の結果、締付軸力は衝撃繰返し数の増加に伴って、図8の模式図に示すように変化することが明らかになった。本研究では、締付軸力の変化がほぼ直線的である定常ゆるみの領域とみなせる、200サイクルから400サイクルまでの間の1サイクル（左・右1回の衝撃を1サイクル）当たりの平均軸力低下量を軸力低下率 δ と名付け、この値をゆるみの評価パラメータに用いる。

ゆるみ試験では、まず、 $\delta=1$ N/cycleをゆるみ限界と定め、ステアケース法によってそれぞ

Fig. 5 Newly developed compression-type load cell

* 図4の締結部の圧縮ばね定数 K_c は $1480 \text{ N}/\mu\text{m}$ （実験値）であった。

Fig. 8 Typical self-loosening behavior

Fig. 9 Results of self-loosening tests by staircase method

れの試験方法に対するゆるみ限界エネルギーを求め、次に初期締付軸力 F_{f0} の値、衝撃エネルギー E_n の値、締結部の剛性と接合面の状態の組合せなどを変化させ、試験方法 A と B の比較を行うと共に、ゆるみに影響を及ぼす因子に関して検討を行っている。

4. 試験結果および考察

図 9 に、初期締付軸力 F_{f0} が 20 kN の場合のステアケース法によるゆるみ試験結果を示す。図中の ● 印および ○ 印はそれぞれ、3.3 項で定義したゆるむ ($\delta > 1$ N/cycle) およびゆるまない ($\delta < 1$ N/cycle) 状態を示している。破線で示されているゆるみ限界エネルギーは、試験方法 A の場合 2.7 N·m、B (接合面に MoS_2 ペーストを塗布) の場合 3.0 N·m、B' (接合面にマシン油 (ISO VG 46) を塗布) の場合 5.7 N·m であり、これらの値は接合面における摩擦仕事の大きさに依存していると考えられる。

図 10 は、試験方法 A、B それぞれについてゆるみ限界エネルギーを負荷した場合の締付軸力の変化の様子

Fig. 10 Variation of preload during self-loosening test

Fig. 11 Self-loosening characteristics for methods A and B

を示している。試験方法 A と B による結果を比較すると、試験開始直後の急激な軸力低下 (初期ゆるみ) や定常ゆるみの領域での挙動など両者は良く一致した傾向を示している。

図 11 は衝撃エネルギー E_n を変化させた場合の、2 種類の試験方法による軸力低下率 δ の変化の様子を示している。試験方法 B では、衝撃エネルギー E_n の増加に伴い、軸力低下率 δ はほぼ直線的に増加しているが、試験方法 A では、 E_n が高い範囲で δ が急激に増加する傾向がみられる。なお、同一の試験片を再使用した場合 (● および ▲)、試験方法 A では δ の値

Fig. 12 Effect of preload on self-loosening characteristics

Fig. 13 Effects of stiffness and contact plane on self-loosening characteristics

が若干増加する傾向が見られるが、1回目と2回目の試験での δ の値の差はそれほど大きくなく、両者は良く一致した挙動を示している。

図 12 は、衝撃エネルギー一定で、初期締付軸力 F_{f0} を変化させた場合の結果である。この場合にも、ゆるみ限界に対応する締付け力 ($F_{f0} = 20 \text{ kN}$) よりも低い締付け力の範囲において、試験方法 A の方が、B よりもかなり大きな軸力の低下を示している*。

図 13 は、上述の試験方法の影響をさらに詳しく調べ

* 試験方法 A の $F_{f0} = 10 \text{ kN}$ の場合、軸力が急激に低下したため、試験を途中で打ち切っている。

Fig. 14 Displacement of the upper plate after impact

るため、試験方法 A, B, および接合面の状態とロードセルの種類を交互に変えた 2 種類の試験 (C および D) における E_n と δ の関係を示している。図 13 よりゆるみ特性は、被締付部材の剛性にはほとんど影響を受けず、接合面の状態 (摩擦特性) に大きく依存していることがわかる。

図 14 に、定常ゆるみ領域における衝撃負荷時の衝撃受板の変位を示す。衝撃が負荷されると、まず衝撃受板は、衝撃方向 (図 14 の上方向) に変位し、この時、ボルトにはナット座面の摩擦 (座面が滑らない場合を含む) を介してたわみによるばね力が蓄えられる。接合面に鋼球を挟んだ試験方法 A および C では、衝撃負荷後、このばね力を初期値とする減衰振動を起こしている。一方、面接触の接触面をもつ場合 (B および D)、接合面の摩擦により、振動は急激に減衰している。接合面の摩擦係数を更に大きくした場合、この傾向はより顕著となり、図 14 の試験方法 B' の場合は、衝撃受板は負荷時の最大変位を維持している**。これらの結果からも、衝撃を受けるねじ締結体の挙動は接合面の状態に大きく依存し、被締付部材の剛性はほとんど影響を及ぼさないことが明らかで、このことは図 13 の結果と対応している。

** 試験方法 B' の場合のみ、負荷される衝撃エネルギーはゆるみ限界エネルギー (図 9) より小さい。

Fig. 15 Relation between maximum displacement of upper plate and preload reduction rate

図 15 は、ゆるみ限界近傍における衝撃受板の最大変位と軸力低下率の関係を示している。前述のように、種々の試験方法で接合面の状態は大きく異なり、ゆるみ限界エネルギーの値も一定ではないが、図 15 のように衝撃受板の最大変位量で整理すれば、ねじのゆるみ特性は試験方法によって顕著な差を生じず、このことから従来の試験方法 (A) の結果からでも、実際のねじ締結体のゆるみ挙動をある程度まで推定できることが明らかとなった。

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) 電氣的に制御されたハンマにより、ボルトの軸直角方向に繰返し衝撃を負荷するゆるみ試験機を設計・試作した。
- (2) (1) の試験機を用い、従来の引張型ロードセルと接合面に鋼球を挟んだ試験方法 (A) と、新たに提案した圧縮型ロードセルと実際に近い接合面の組合せをもつ試験方法 (B) によるゆるみ特性の比較を行った。
- (3) ねじのゆるみ限界エネルギーは接合面の状態によって大きく異なるが、衝撃受板の最大変位量を指標として結果を整理すればゆるみ限界近傍ではゆるみ特性は、試験方法による顕著な差を生じないことが明らかになった。

終わりに、試験機の製作に際し、多大なる御援助を賜った東京工業大学精密工学研究所附属工場 (工場主任：羽太芳郎) の職員の方々に感謝を表します。

文 献

- 1) 例えば、山本 晃、賀勢晋司：異なるゆるみ試験形式によるゆるみ止めねじ部品の性能比較，精密機械，48，6(1982) 801。
- 2) G. H. Junker: New Criteria for Self-loosening of Fasteners under Vibration, SAE Paper 690055, (1969)。
- 3) 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 (1976) 507。
- 4) 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。
- 5) 賀勢晋司：軸直角外力によるねじのゆるみの機構について，精密機械，51，9 (1985) 1789。
- 6) F. Röttscher: Die Maschinenelemente, Springer-Verlag, Berlin, (1927) 234。

会 報

昭和 62 年度第 5 回理事会議事

日時 昭和 62 年 9 月 22 日 (火)，17 時 30 分～21 時 30 分

場所 サンパークホテル会議室

議事 1. 前回議事録確認の件

2. 昭和 62 年度精密工学会技術賞受賞者決定の件

3. 昭和 63 年度役員選出委員会設置の件

4. 昭和 62 年度精密工学会賞，精密工学会論文賞および沼田記念論文賞審査委員会設置の件

5. 国際会議共催および協賛承認の件

6. 将来分野開拓 ad hoc 委員会答申検討の件

7. 精密工学会と千葉県との協力に関する件

8. 会計に関する件

9. 昭和 62 年 11 月総務委員会を昭和 62 年度第 6 回理事会に変更する件

10. 入退会者資格変更者承認の件

11. 報告事項