

軸直角方向負荷下でのボルト・ナット締結体のすべり・ゆるみ挙動*

(第2報, 限界相対すべり量及びボルト頭部の傾き係数の評価)

西村尚哉^{*1}, 服部敏雄^{*2}, 森 智志^{*3}
佐合一馬^{*4}, 山下 実^{*1}, 成瀬友博^{*5}

Loosening and Sliding Behavior of Bolt-Nut Fastener under Transverse Loading

(2nd Report, Evaluation of Critical Relative Slippage and Inclination Compliance of Bolt Head)

Naoya NISHIMURA^{*6}, Toshio HATTORI, Satoshi MORI,
Kazuma SAGOH, Minoru YAMASHITA and Tomohiro NARUSE

^{*6} Department of Mechanical and Systems Engineering, Gifu University,
1-1 Yanagido, Gifu-shi, Gifu, 501-1193 Japan

Most of machines and products have many joint portions (e.g. fastening, welding and adhesive joints) for the efficient productivity and maintainability. Especially, the thread joint has been frequently used for these purposes. However, troubles such as loosening of bolt and fracture or failure at joint portion have often arisen, thus many attentions have been paid on the improvement of the strength and reliability of the thread joint. In this paper, we present the investigated results of the sliding and the loosening behavior of bolt-nut fastener under the transverse loading condition. Firstly, the critical relative slippage (S_{cr}), less than the displacement in which the thread joints can keep the fastening, is experimentally obtained from cyclic loading test. When the relative slippage exceeds S_{cr} , the Fastening preload rapidly decreases. Then, this critical relative slippage is estimated according to the theoretically obtained equation considering the bending deformation of bolt and the geometrical constraint condition. The inclination compliance (k_w) that represents the pseudo-rigidity at the bolt head portion in this equation is evaluated by comparing the experimental result with the corresponding analytical one. In consideration of the nonlinearity of k_w with respect to the Fastening preload, the critical relative slippage is well determined by the formula for arbitrary Fastening preload.

Key Words: Structural Reliability, Fixing, Experimental Mechanics, Loosening and Sliding Behavior, Bolt-Nut Fastener, Critical Relative Slippage, Inclination Compliance of Bolt Head, Transverse Loading

1. 緒言

機械構造物の強度・信頼性上のトラブルは継手部(締結・接合・接着部)で主に発生しており, ねじのゆるみや破損による重大事故(航空機前輪格納庫のボルト脱落, ジェットコースターボルトゆるみ事故等)が最近目立っている。ねじ締結は機械要素として最も多用されているが, 締結部の軸直角方向すべり量がある限界値を超えると回転

ゆるみが生じ, 急速な軸力低下^{(1)~(2)}が問題となっている。

これらトラブルの原因の一つとして, 設計時に用いられるCAE解析において継手部のモデル化及び変形挙動や強度を十分に評価できていないことが挙げられる。三次元有限要素法によるねじ山のらせん形状を考慮したゆるみ機構の解明等の詳細な数値解析^{(3)~(5)}が報告されているが, 締結部を多数有する構造物の解析には, 計算時間等の制約もありこの解析手法を適応するには至っていない。製品設計等において, CAE解析で利用可能な計算効率のよい締結部簡易モデリングが必要であり, そのためにも継手部の正確な挙動や機械的特性を評価, 取得することが求められている。

* 原稿受付 2008年10月17日。

^{*1} 正員, 岐阜大学工学部機械システム工学科(〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)。

^{*2} 正員, フェロー, 岐阜大学工学部機械システム工学科。

^{*3} 岐阜大学大学院工学研究科。

^{*4} 学生員, 岐阜大学工学部機械システム工学科。

^{*5} 正員, (株)日立製作所機械研究所(〒312-0034 ひたちなか市堀口832-2)。

E-mail: naoya@gifu-u.ac.jp

軸直角方向負荷下でのねじ締結体のゆりみに関する実験結果はいくつか報告されている^{(6)~(12)}. 其中で解析における評価基準となりうる, 締結を保持できる限界相対すべり量やその評価式についての検討^{(9)~(12)}もなされている. しかしながら, これらは固定板へのねじ込みボルトによる実験を実施しボルト単体での評価を行っており, ボルトナット締結による限界相対すべり量評価の試みはなされていない. 製品設計や信頼性向上のためにも, 継手部におけるJAE解析のための機械特性汎用データベース(等価剛性, 限界相対すべり量, 減衰率等)の構築が求められている.

そこで本研究では, ねじの回転ゆりみに対する評価基準として利用可能な, 限界相対すべり量の測定および前報⁽¹⁴⁾で提案した評価式に含まれるボルト頭部の傾き係数算出を目的とする. ねじ(ボルトナット)締結体の軸直角方向負荷下でのすべり, ゆりみ挙動を調べるため, 準静的及び繰返し軸直角方向負荷試験を実施し, 締結体の変形・すべり挙動及び回転ゆりみを生じない限界相対すべり量を求めた. さらに限界相対すべり量の実測値と評価式⁽¹⁴⁾による予測値の比較から, ボルト頭部の傾き係数を評価した.

2. ねじ締結体のすべり挙動

ねじ締結体のすべり・変形挙動を図1に示す. 締結体に軸直角方向負荷が加わった場合, 負荷荷重により締結体の変形挙動は異なる. 低荷重ではボルト及び被締結材は一体として変形する(図1(a)). 摩擦力(初期締付け軸力 F_0 ×ボルトの本数 n ×摩擦係数 μ)以上の荷重が締結体に加わった場合, 被締結材間接触面にすべりが生じる. しかし2枚の被締結材間の相対変位 S が小さいときには, ボルトに曲げ変形が生じることによりボルト頭部座面と被締結材間の接触面でのすべりは生じない(図1(b)). 締結材間接触面では摩擦力以上の荷重を受け持てないため, それ以上の荷重はボルトの曲げ変形で受ける. 荷重がさらに加わり被締結材の両接触面で受け持てる限界値, すなわち上記摩擦力の2倍の値に到達すると, ナット座面あるいはボルト座面と被締結材の接触面ですべりが生じる(図1(c)).

被締結材が往復すべりを繰返しても回転ゆりみが発生しない最大すべり量を限界相対すべり量 S_{cr} という.

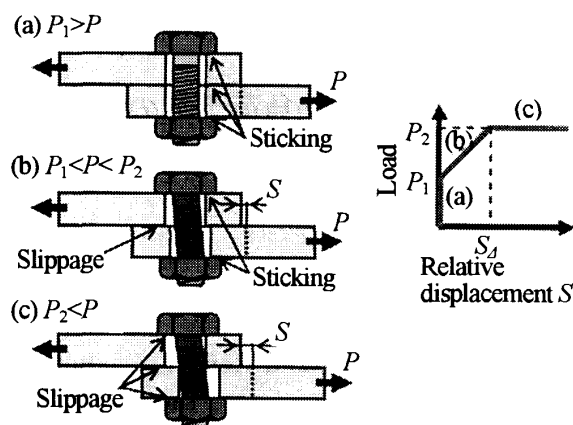


Fig.1 Behavior of the thread joint (bolt-nut fastener) in different load condition

3. 締結を保持できる限界相対すべり量 S_{cr}

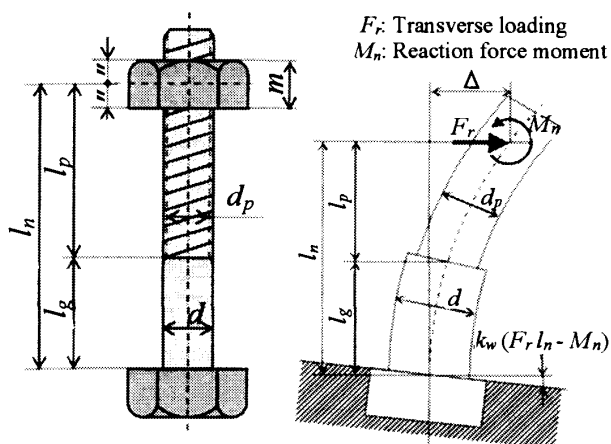
山本, 賀勢^{(11)~(13)}らは, 軸直角方向往復すべりによるねじの回転ゆりみに関して, ねじ面が金属接触で被締結体が金属材料の場合の実験結果を用い, 限界相対すべり量評価式を提案している. 筆者らは前報⁽¹⁴⁾において, 限界相対すべり量評価式におけるナットによる拘束モーメント評価式について検討し, 新しい評価式を提案した. 締結を保持できる限界相対すべり量 S_{cr} は, ボルトの曲げ剛性及びボルト頭部の傾き係数に支配される. S_{cr} は, ボルトの代わりに図2に示すような単純なりの曲げ変形を仮定して導出される次式で表される.

$$S_{cr} = 2F \left[\mu_w \left(\frac{l_g^3}{3E_b I_g} + \frac{l_p^3}{3E_b I_p} + \frac{l_g l_p l_n}{E_b I_g} + k_w l_n^2 \right) - \left(\frac{C_l (d^2 + d_1^2)}{8d} \right) \left(\frac{l_g^2}{2E_b I_g} + \frac{l_p^2}{2E_b I_p} + \frac{l_g l_p}{E_b I_g} + k_w l_n \right) \right] \quad (1)$$

式(1)において,

- F : ボルト軸力
- μ_w : ボルト座面・被締結材間の摩擦係数
- μ_s : ボルトはめあいねじ部の摩擦係数
- k_w : ボルト頭部の傾き係数
- E_b : ボルトの縦弾性係数
- d, d_1 : ボルトの外形, 谷径
- I_g, I_p : ボルトの断面二次モーメント
- C_l : ねじ一山目の荷重分担率
- α : ねじ山角度 ($\cos^2 \alpha = 0.75$)

である. S_{cr} は, ボルト軸力 F に比例する.



(a) Dimensional symbol of bolt-nut fastener structure (b) Deflection of bolt by transverse loading
 Fig.2 Estimation of critical relative slippage S_{cr} by using the simple beam model

4. 実験

4・1 締結体 図3に締結体及び各種センサーの略図を示す。締結用ボルトには市販のISO強度区分4.8のメートル並目ねじM16×2(ピッチ)×55(ねじ部長さ40mm)を使用した。用いたM16ボルトの仕様を表1に示す。締結用ナットには、ボルトと同質の市販六角ナット(1種)を使用した。図3に示すように締結体として使用したボルトは1本で、軸力測定用に内部に抵抗線ひずみゲージを貼り校正後使用した。できるだけ製品誤差やねじ面のめっきの影響を取り除くため、ねじ切り作業を施してから実験を行った。被締結材には市販の一般構造用圧延鋼材SS400を用いた。厚さ9mmの板材から64mm×157mmに切出し、ボルト挿入用の穴加工をした後、両表面には板長手方向に平面研削を施した。実験の際に潤滑剤は使用せず、被締結材表面をアセトンにより脱脂してから使用した。ボルトナットの座面間距離による影響を調べるため、厚さ6mmの板材を使用した実験も実施した。

Table 1 Specifications of M16 bolt

Nominal diameter [mm]	Ultimate tensile strength [MPa]	Proof stress [MPa]	Effective sectional area [mm ²]	Standard Fastening preload [kN]
16	392	314	157	34.5

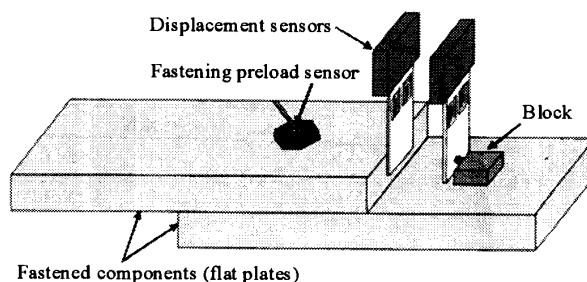


Fig.3 Bolt-nut fastener and sensors

4・2 実験装置 本報告ではボルトの軸直角方向に準静的あるいは繰返し負荷を与えるため油圧ポンプを備えた疲労試験機を使用した。試験装置は油圧ポンプ、サーボ弁、サーボコントローラ、関数発生器、ロードセルで構成されている。

4・3 実験方法 ボルトナット締結体に準静的及び繰返し負荷を与え、締結体に加わる軸直角方向の荷重、締結用ボルトの軸力、2枚の被締結材の相対変位の測定を行った。図3に示した締結体の下側被締結材に小ブロックを設置し、上下の被締結材の変位から相対変位を求めた。

準静的負荷実験では、種々のボルト軸力(15kN, 20kN, 25kN, 30kN, 35kNの5種類)のボルトナット締結体に準静的引張負荷を与え、ボルト座面すべりが生じる限界荷重を調べた。

繰返し負荷(引張-圧縮)実験では、準静的負荷実験と同条件のボルト軸力について各種一定変位を与えた実験を行った。締結体には1Hzの正弦波負荷(変位)を最大10000回与えた。軸力の低下が著しい場合には振幅の下限が0を示した段階で停止した。本実験では締結を保持できる(軸力の著しい低下がない)限界相対すべり量 S_{cr} を求めることを目的としているため、締結体を与える変位量は各軸力で異なる。

5. 実験結果及び考察

5・1 準静的負荷実験 相対変位と軸直角方向荷重の関係を図4に示す。引張負荷の結果で、ボルト軸力による限界荷重について比較した。

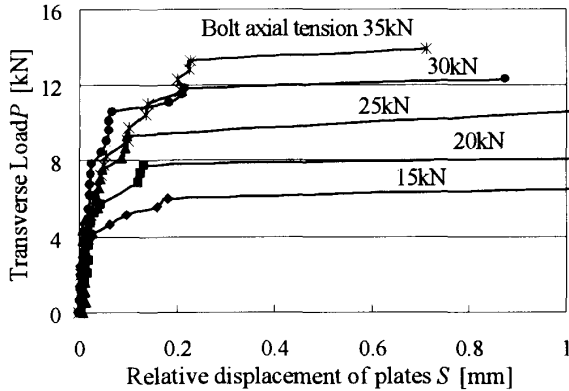


Fig.4 Dependence of transverse load on relative displacement

Table 2 Critical load for each Fastening preload

Fastening preload [kN]	Critical load [kN]	Frictional coefficient of thread joints
15	6.0	0.20
20	7.8	0.19
25	9.8	0.20
30	12.5	0.21
35	15.2	0.22

各ボルト軸力においてボルト座面すべりが生じた限界荷重を表2に示す。ボルト軸力が低いほど低荷重ですべりが生じることがわかる。2章で述べたように、摩擦係数とボルト軸力の積の2倍の荷重が締結体に作用したとき被締結材間接触面はボルト座面の両面ですべりを生じるので、表2に示したボルト軸力と限界荷重より摩擦係数を算出した。その結果、今回実験で使用した締結体の摩擦係数は約0.2となった。

被締結材間の相対すべり長さである相対変位は、図3に示すように実験中変位センサにより計測される。引張荷重が増加せずすべり長さが増加するとき、図4に示すようにボルト座面すべりが生ずる。このときの変位量が限界相対変位であり、固着からすべり状態への遷移点に対応する。しかしながら、この限界相対変位はわずかな実験条件の変化の影響を受けやすいため、高精度に計測することが難しい。本研究では、締結を保持できる(繰返し負荷が与えられても軸力の著しい低下がない)限界相対すべり量 S_{cr} を求めることを目的としているため、繰返し負荷下での軸力変化に着目し、繰返し変位振幅とボルト軸力の関係より S_{cr} の評価を行う。

5・2 繰返し負荷実験 一例として初期締付け軸力 15kN の場合のボルト軸力と繰返し数の関係を図5に示す。締結体に与えた変位量(振幅)による軸力低下の違いについて比較した。

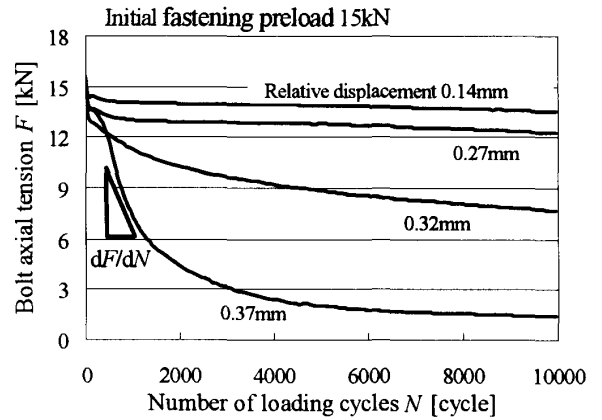


Fig.5 Dependence of Fastening preload on number of loading cycles

繰返し負荷実験において、相対変位量が多い場合、ボルト軸力の低下が著しいことが確認できた。軸直角方向負荷によりボルト座面において相対すべりが生じ、ボルトの回転ゆるみが発生するため軸力が低下する。繰返し数に伴い軸力が低下するゆるみ速度は相対変位量に依存する。

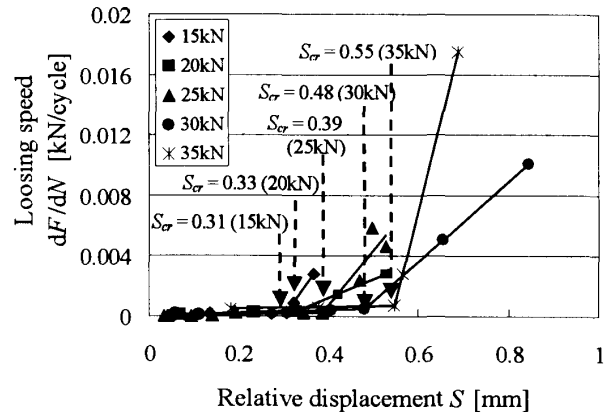


Fig.6 Dependence of dF/dN on relative displacement

実験結果から締結を保持できる限界相対すべり量 S_{cr} を求めるため、図5に示すように各一定相対変位の結果から、繰返し負荷に対する軸力低下割合として、ゆるみ速度 dF/dN を算出した。ゆるみ速度算出の際、全ての試験において、ほぼ線形に軸力が低下するとみなせる、繰返し数 500 回から 1000 回の軸力変化により dF/dN を計算した。各ボルト軸力において求めた、ゆるみ速度-相対変位の関係を図6に示す。ほとんど軸力低下のない低

ゆるみ速度の結果と高ゆるみ速度の結果を用いたそれぞれの近似直線の交点、つまり、ゆるみ速度が急に変化する相対変位を限界相対すべり量 S_{cr} とし、各軸力で求めた値を図中に示した。相対すべり量が S_{cr} を超えると軸力の低下が著しく、初期締付け軸力が低いほどゆるみ速度が速い。

5.3 ボルト頭部の傾き係数 k_w 評価 図7に繰返し負荷実験で求めた締結を保持できる限界相対すべり量 S_{cr} とボルト軸力 F の関係を示す。ボルト軸力 35kN における限界相対すべり量 S_{cr} を式 (1) に代入して、ボルト頭部の傾き係数 k_w を計算すると $0.91 \times 10^{-4} (\text{kN} \cdot \text{mm})^{-1}$ となる。ボルト軸力が高い領域において、ねじ込みボルトでの実験により、M10 ボルトの $k_w^{(11)}$ は $1.61 \times 10^{-4} (\text{kN} \cdot \text{mm})^{-1}$ 、M22 ボルトの $k_w^{(9)}$ は $0.14 \times 10^{-4} (\text{kN} \cdot \text{mm})^{-1}$ と報告されている。ボルト直径が大きくなると剛性が高くなりボルト頭部が傾きにくくなるため、剛性の逆数を示す傾き係数は小さな値を示す。本研究で得られた M16 ボルト頭部の傾き係数は、両報告での値の間に位置し、妥当な結果が得られたと考える。

上記 k_w 値を用いて式 (1) により予測した S_{cr} 値を図7中実線で示す。ボルト軸力が低くなるに従って、予測値と実測値との差が大きくなるのがわかる。図8に、繰返し負荷実験で求めた各ボルト軸力での S_{cr} を式 (1) に代入して、 k_w を計算した結果を示す。ボルト軸力が低い領域ではねじ面や座面での接触面圧が低く、ねじ締結体のみかけの剛性が低下するため、はめあいねじ部が傾きやすくなり、 k_w はより大きな値を示すと考えられる。ボルト頭部の傾きを抑えるための十分な拘束力を得るためには、ある程度以上の接触面圧が必要であると考える。

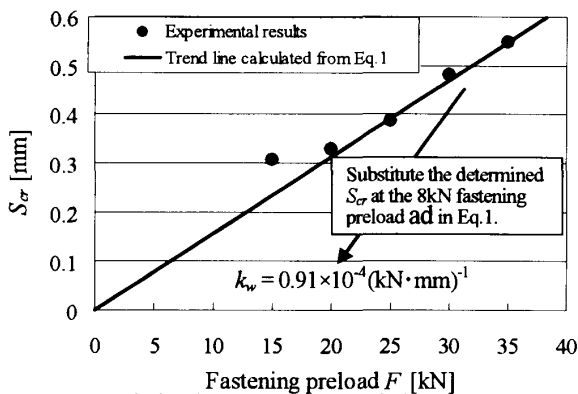


Fig.7 Relation between critical relative slippage and Fastening preload

山本、賀勢ら⁽¹¹⁾の研究では、締結軸力が高い領域を対象としており、 k_w の値は一定として、限界相対すべり量 S_{cr} がボルト軸力 F に比例するとしても問題ないとされている。本研究では、データベース構築という観点で、軟質被締結材の締結にも対応できるよう広範囲なボルト軸力における評価が求められる。そのため低軸力における限界相対すべり量も検討し評価式による予測精度を向上する必要がある。ボルト頭部の傾き係数 k_w は低締付け領域においてボルト軸力 F に反比例し、ある締付け力以上で一定値になることが報告されている⁽⁹⁾。これらの報告^(9,11)では、六角ナットを使用せず、ブロックへ直接ねじ込む締結によるボルト単体の挙動評価を行っている。本研究では、上記評価手法をボルトナット締結体に適用する。本研究で使用した締結体では、図8に示すように M16 ボルト頭部の傾き係数 k_w を次式で評価する。

$$k_w = \frac{18.7}{F} \times 10^{-4} (\text{kN} \cdot \text{mm})^{-1} \quad \text{for } F < 20.5 \text{ kN} \quad (2)$$

$$k_w = 0.91 \times 10^{-4} (\text{kN} \cdot \text{mm})^{-1} \quad \text{for } F \geq 20.5 \text{ kN} \quad (3)$$

式 (2) は 20.5kN よりも低いボルト軸力の状態での限界相対すべり量 S_{cr} 評価において有効な式である。このボルト軸力、20.5kN、は k_w を一定値として扱うことができる最小軸力を示す。

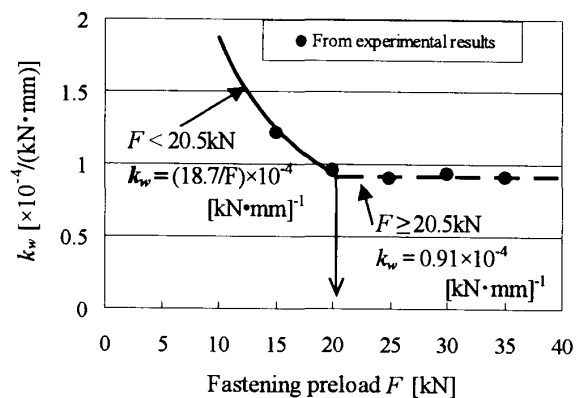


Fig.8 k_w values obtained by experiment and their corresponding fitting curve

図9に繰返し負荷実験での S_{cr} の結果と、式 (2)、(3) によって計算される k_w を用いた式 (1) による解析結果の比較を示す。

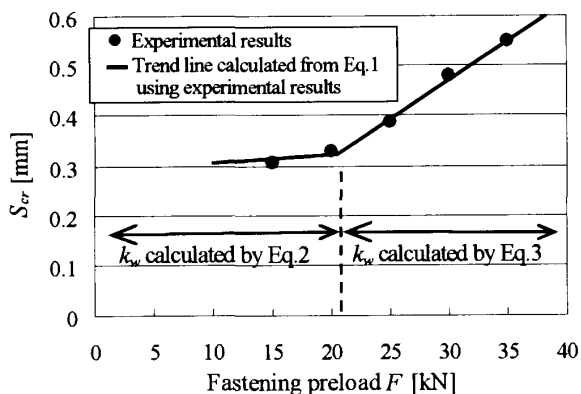


Fig. 9 Estimated S_{cr} by experiment

ボルトナット締結体においても、ボルト頭部の傾き係数 k_w をボルト軸力 F に反比例する領域、式 (2)、と一定値となる領域、式 (3)、で評価することにより、任意のボルト軸力における限界相対すべり量 S_{cr} を評価式 (1) により推定できることがわかった。本研究で得られた S_{cr} や k_w は、軸直角方向負荷下でのボルトナット締結体のゆりみ評価におけるおおよその変形しきい値として利用可能である。高軸力での実験においてボルト座面付近での破損も確認されており、今後、評価式の精度向上を図るとともに、ボルトの疲労破壊も含めたゆりみ評価も進めていく。

5・4 座面間距離の影響 被締結材の厚さを 9mm から 6mm に変更し、前節までに述べた同様な実験、評価を行いボルトナット座面間距離の変化が結果に及ぼす影響を調べた。図 10 にボルト軸力 35kN における準静的負荷実験でのすべり挙動の比較を示す。

被締結材の板厚を変更しても、座面すべりが生じる限界荷重は変化せず締結体の摩擦係数は同程度であることがわかる。また、板厚を薄くすることにより、座面すべりが生じる限界相対変位は小さくなっている。座面間距離が短くなることにより、同じ軸直角方向負荷が作用してもボルトのたわみ量が小さくなることによる。

図 11 に、被締結材板厚 6mm の場合の繰返し負荷実験における S_{cr} の結果と、次式で示す、5・3 節で述べた k_w 評価法を用いた式 (1) による解析結果の比較を示す。

$$k_w = \frac{17.7}{F} \times 10^{-4} (kN \cdot mm)^{-1} \quad \text{for } F < 19.8kN \quad (4)$$

$$k_w = 0.9 \times 10^{-4} (kN \cdot mm)^{-1} \quad \text{for } F \geq 19.8kN \quad (5)$$

被締結材板厚 9mm での結果と比較すると、ボルトナット座面間距離が変化することにより準静的負荷実験での結果と同様に、ボルトがたわむことができる変形量が増えるため、限界相対すべり量 S_{cr} の値は異なる。しかしながら、高軸力でのボルト頭部の傾き係数 k_w 値や反比例領域と一定値領域の遷移ボルト軸力など、式 (2)、(3) と式 (4)、(5) はほぼ一致している。したがって、ボルト頭部の傾き係数 k_w は座面間距離には依存せず、ボルト径固有の値であることが確認できた。

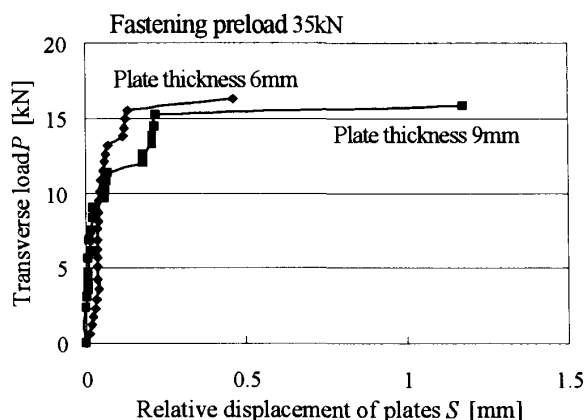


Fig. 10 Relatives between transverse load and relative displacement

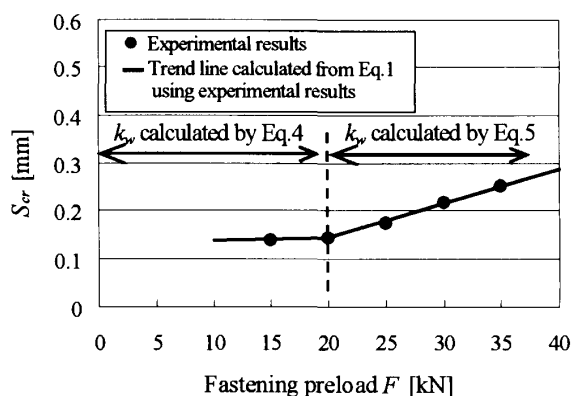


Fig. 11 Estimated S_{cr} by experiment (Plate thickness 6mm)

6. 結 言

本報告では継手部の中で特に使用頻度の高いねじ締結体のゆるみ評価用 CAE データベース構築を目的に軸直角方向負荷試験を実施し、ボルトナット締結体のすべり・ゆるみ挙動を調べた。以下にその結論を示す。

- (1) 繰返し負荷試験により、各ボルト軸力において、締結を保持できる限界相対すべり量 S_{cr} が求まった。 S_{cr} を超えない限りボルト軸力が大幅に低下することは無い。
- (2) ボルト頭部の傾き係数 k_w の非線形性を考慮することにより、低ボルト軸力の場合でも評価式から限界すべり量を決定できることが分かった。
- (3) ボルト頭部の傾き係数 k_w はボルトナット座面間距離に依存せず、ボルト径固有の値である。

文 献

- (1) Junker, G. H., New Criteria for Self-Loosening of Fasteners Under Vibration, *SAE Transactions*, Vol. 78 (1969), pp.314-335.
- (2) Pai, N. G. and Hess, D. P., Experimental Study of Loosening of Threaded Fasteners due to Dynamic Shear Loads: *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 253, No.3 (2002), pp.585-602.
- (3) Izumi, S., Yokoyama, T., Iwasaki, A. and Sakai, S., Three-dimensional Finite Element Analysis on Tightening and Loosening Mechanism of Bolted Joint, *Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.71, No.702 (2005), pp.204-212.
- (4) Fujioka, Y. and Sakai, T., Verification of Self-Loosening Mechanisms for Threaded Fastener -1st Report, Behaviour and Effective Factors for Bolt Loosening under Transverse Cyclic Load Generated by Linearly Vibrating Washer-, *Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.71, No.711 (2005), pp.3270-3277.
- (5) Fukuoka, T., Nomura, M. and Morimoto, Y., Proposition of Helical Thread Modeling with Accurate Geometry and Finite Element Analysis, *Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.72, No.723 (2006), pp.1639-1645.
- (6) Yamamoto, A. and Kasei, S., Investigations on the Self-Loosening of Threaded Fasteners under Transverse Vibration -A Method to Display the Locking Performance and Evaluation of Locking Device-, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 42, No.6 (1976), pp.507-511.
- (7) Hashimura, S. And Socie, D. F., A study of Loosening and Fatigue Failure of Bolted Joints under Transverse Vibration, *Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.72, No.716 (2006), pp.1297-1304.
- (8) Yazawa, S. and Hongo, K., Loosening of a Bolt-Nut Connection Induced by a Tangential Load Applied to a Clamped Plate, *Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.53, No.496 (1988), pp.2645-2654.
- (9) Nakamura, M., Hattori, T., Sato, S. and Umeki, T., Self Loosening Behavior of Bolted Joints under Transverse Cyclic Loading, *Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series C*, Vol.64, No.627 (1998), pp.4395-4399.
- (10) Kasei, S., Ishimura, M. and Ohashi, N., On Self-loosening of Threaded Joints in the Case of Absence of Macroscopic Bearing-surface Sliding -Loosening Mechanism under Transversely Repeated Force-, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol.54, No.7 (1988), pp.1381-1386.
- (11) Yamamoto, A. and Kasei, S., Investigations on the Self-Loosening of Threaded Fasteners under Transverse Vibration -A Solution for Self-loosening Mechanism-, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 43, No.4 (1977), pp.470-475.
- (12) Yamamoto, A., Kasei, S. and Kubo, T., Investigations on the Self-Loosening of Threaded Fasteners under Transverse Vibration -Theorization of Locking Performance Curve-, *Journal of the Japan Society of Precision Engineering*, Vol. 43, No.9 (1977), pp.1069-1074.
- (13) Yamamoto, A.: *Principle and design of thread joint*, Yokendo Ltd.(1995), pp.120-127.
- (14) Nishimura, N., Hattori, T., Mori, S., Sagoh, K., Yamashita, M. and Naruse, T., Loosening and Sliding Behavior of Bolt-Nut Fastener under Transverse Loading -1st Report, Investigation and Modification of Equation which Evaluates The Reaction Force Moment-, *Transactions of the Japanese Society of Mechanical Engineers, Series A*, Vol.?, No.? (2009), pp.2-8.