

応力緩和現象がプラスチックボルト締結の非回転ゆるみに及ぼす影響 Influence of Stress Relaxation on Non-Rotational Loosening of Bolted Polymer Joints

精密工学専攻 1号 赤井 達郎

Tatsuro Akai

1. 緒言

ボルト締結は高い信頼性と優れた分解性を有することから、多くの機械的組立構造に使用されている。近年、モバイル電子機器や輸送機械内装部品での軽量化・リサイクル性・絶縁性・非磁性化への要求が厳しくなっているが、プラスチックボルトは機械的強度が低いものの、前記の要請を満たす十分な機能を有している。

こうした応用分野において、プラスチックボルトで最も問題となるのは使用中のゆるみである。例えば高密度実装機器等で非回転ゆるみによる締結の不安定化が発生すると、部品接続トラブルにつながりやすい。プラスチックボルトの非回転ゆるみに関わる根本的な技術開発課題は、材料特有の粘弾性現象の解明である。すなわちプラスチックボルト締結の場合、粘弾性現象は応力緩和による非回転ゆるみにつながると推測できる。

Fig. 1 に本研究の概要を示す。最初にボルト締結条件が応力緩和現象によって非回転ゆるみに強く影響することを明らかにする。次いで非回転ゆるみ特性について実験的に明らかにするとともに、ボルト締結部の応力分布を有限要素法によって解析する。以上の結果を用いて、締結条件がプラスチックボルトの応力緩和現象にどのような影響を及ぼしているかを明らかにする。

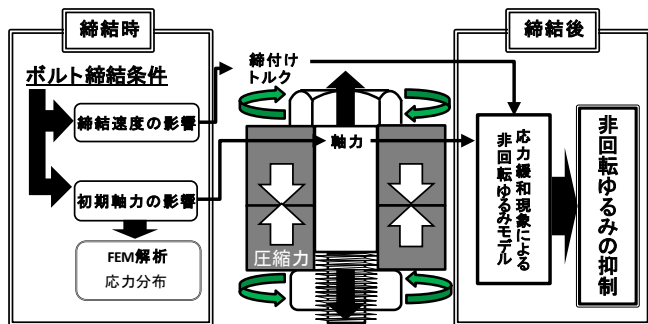


Fig.1 Research flow and strategy

2. プラスチックボルトの非回転ゆるみ

ボルト締結のゆるみとは軸力の低下を意味しており、回転ゆるみと非回転ゆるみがある。このうち、本研究では応力緩和現象に起因する非回転ゆるみを対象とする。

2.1 ボルト軸部における応力緩和現象

ボルト締結は、Fig. 2 のような基本構成となる。ボルト頭部にトルクを加えて回転させることによって斜面の原理により軸部に引張力を与え、非締結部材に圧縮力を発生させ、これらの力を維持させることにより締結を保持している。

本研究で対象とする非回転ゆるみとは、締付けと反対方向に戻り回転することなく軸力が低下する現象を意味している。その原因としてはボルトの塑性伸び、被締結体のなじみ・へたり、非締結体の塑性縮み、ボルトのクリープ伸び、非

締結体のクリープ縮み、ボルトの熱膨張、応力緩和現象などがある。このうち本研究の対象は、応力緩和現象が非回転ゆるみ、すなわち軸力低下に及ぼす影響である。

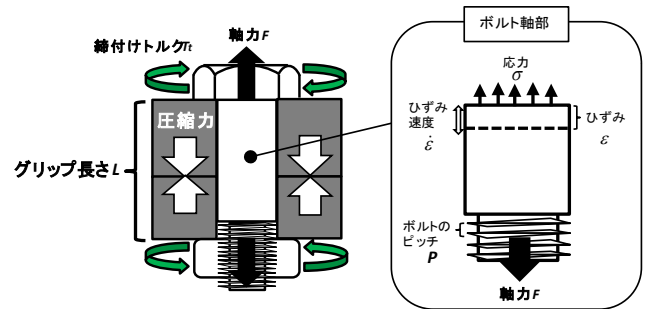


Fig.2 Tightening mechanism of bolted joint

プラスチックは弾性と粘性の両方の特性を持つ粘弾性材料である。一定ひずみを与えた状態で放置しておくと、応力が時間とともに減少する。この現象が粘弾性に基づく応力緩和現象である。Fig. 2 のボルト軸部を対象に、この応力緩和現象がどのように発生するかについて以下で説明する。

ボルト軸部は、均一な材質の丸棒で引張力により均一な応力が発生しているものと仮定する。ボルト締結時に加えられるトルクによって発生する応力とその時の軸部のひずみ速度の関係は粘弾性理論から以下のように説明される。

初期軸力 F_0 の作用によってボルト軸部には初期応力 σ_0 (=初期軸力 F_0 /ボルト有効断面積 A_0) が発生する。この初期応力 σ_0 とクリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ の関係は式 (1) のべき法則で表される⁽¹⁾。

$$\dot{\epsilon}_c \propto \sigma_0^n \quad (1)$$

ここで n は応力指数であり、ほぼ 1 より大きな値をとる。実験的に求められるこの応力指数 n は初期軸力 F_0 と比例関係にあり、後述する式 (6) へ影響する。

絶対温度 T とクリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ の関係はアレニウス式として次の式 (2) のように表される。ここで、 Q は活性化エネルギー、 R は気体定数を表す。

$$\dot{\epsilon}_c \propto e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (2)$$

式 (1)、式 (2) から、クリープひずみ速度 $\dot{\epsilon}_c$ は式 (3)、クリープひずみ $\epsilon_c(t)$ はナットィングの式として式 (4) がそれぞれ導かれる。ここで、 $\dot{\epsilon}_0$ は締付け直後の軸方向における初期ひずみ速度である。

$$\dot{\epsilon}_c = \dot{\epsilon}_0 \sigma_0^n e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (3)$$

$$\epsilon_c(t) = \dot{\epsilon}_0 \sigma_0^n e^{-\frac{Q}{RT}} t^k \quad (0 < k < 1) \quad (4)$$

ここで、 t はボルト締結後からの経過時間であり、 t の乗数

k はクリープ挙動に対する弾性および粘性の影響を表す尺度である。粘弾性材料の遷移クリープ⁽¹⁾の場合には $0 < k < 1$ の範囲にある。 $k=0$ ではフック弾性、 $k=1$ ではニュートン粘性を示し、 k が0に近いほど時間遅れがなく、1に近いほど時間遅れが大きくなる。

クリープひずみ $\varepsilon_c(t)$ によって生じる応力緩和量 $\sigma_c(t)$ は次式(5)によって表される。ここで、 E_s はプラスチック材の弾性係数を表す⁽²⁾。

$$\sigma_c(t) = E_s \varepsilon_c(t) = E_s \dot{\varepsilon}_0 \sigma_0^n e^{-\frac{Q}{RT} t^k} \quad (5)$$

上式(5)より、応力緩和の大きさを表す指標として緩和係数 α を次式(6)に定義する。

$$\alpha = E_s \dot{\varepsilon}_0 \sigma_0^n e^{-\frac{Q}{RT}} \quad (6)$$

α が大きいほど応力緩和量 $\sigma_c(t)$ は大きくなる。

以上の基本式をボルト軸部に当てはめると、軸力低下 $F_R(t)$ の式(7)が求められる。ここで、 A_b はボルトの有効断面積を表す。

$$F_R(t) = A_b \sigma_c(t) = A_b \alpha t^k \quad (7)$$

また、締結直後からの経過時間 t における軸力を $F(t)$ とすると、軸力低下 $F_R(t)$ は次式(8)のようにも表される。

$$F_R(t) = F_0 - F(t) \quad (8)$$

また、式(8)より軸力 $F(t)$ を初期軸力 F_0 で正規化した比 ϕ を次式(9)に定義する。

$$\phi = \frac{F(t)}{F_0} = \frac{F_0 - F_R(t)}{F_0} = 1 - \frac{A_b \alpha t^k}{F_0} \quad (9)$$

以上のモデルはボルト軸部に均一に応力が生じるものとして考えた。しかし、プラスチックボルトの応力は局所的に異なる分布となる。そこで本研究では、後述するようにFEM解析を行い、応力の局所分布の検証を行った。

2.2 応力緩和に及ぼす締結パラメータの影響

(1) ボルト材料の弾性係数 E_s の影響

プラスチック材料はひずみの増加とともに弾性係数が低下するひずみ依存性を持つ。Fig. 3は予備実験により求めたプラスチック材の弾性係数である。結晶性材料のポリプロピレン(以下、PP)および非結晶性材料のポリカーボネート(以下、PC)の弾性係数を示す。

同図のように弾性係数 E_s は非線形性を示すので、6章において述べるFEM解析ではそれを考慮した弾性係数を用いた。

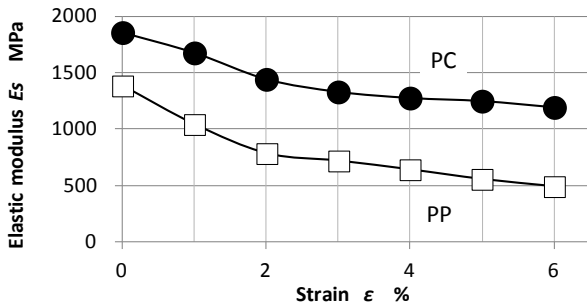


Fig.3 Influence of strain on elastic modulus

(2) ボルトの締め付け速度 $\dot{\theta}$ の影響

ボルト締め付け速度 $\dot{\theta}$ がねじ斜面によってそのまま軸方向速

度に変換されると仮定すれば、ボルト軸部のひずみ速度は次式(10)のように表される。

$$\dot{\varepsilon}_t = \frac{P}{360L} \dot{\theta} \quad (10)$$

ここで、 P はボルトのピッチ、 L はグリップ長さを表す。

(3) ボルトの初期軸力 F_0

初期軸力 F_0 を増加させると、ボルト内部の初期応力 σ_0 と応力指数 n が増加する。その結果、式(6)および式(7)から初期軸力の増加が大きな非回転ゆるみの発生につながる。

以上の考察より、応力緩和現象に基づく非回転ゆるみには式(5)および式(7)より、初期応力 σ_0 および初期ひずみ速度 $\dot{\varepsilon}_0$ の影響を受けることがわかる。これらについて実験的に検証するために、初期軸力 F_0 および締め付け速度 $\dot{\theta}$ をパラメータとした実験を行った。

3. 実験装置及び実験条件

前章で述べたひずみ、応力、軸力、非回転ゆるみ量(軸力低下)に関わる実験を以下のように行った。

3.1 実験装置

本研究で使用するボルト締結装置をFig.4に示す。ボルト締結の回転角度および速度を制御パラメータにとった。ボルト軸力はセンターホール型ロードセル、ボルト内ひずみはボルト軸力用箔ひずみゲージで測定した。ボルト内のひずみは軸部、ねじ部、はめあい部の軸中心部のひずみを計測した。

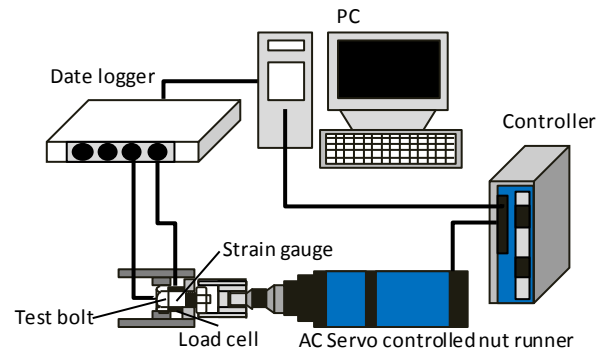


Fig.4 Experimental setup

3.2 実験条件

ボルト、ナットの材料はPPとPCの二種類である。軸径はM8、M12の全ねじ、M10の半ねじを使用した。ボルトの長さはいずれも40mm、50mm、70mmのものを使用した。被締結体のグリップ長さ L は25mm、30mm、35mm、40mmで実験を行った。

4. 実験結果

4.1 軸力低下特性

Fig.5は締結直後からの経過時間 t に対する軸力低下曲線を初期軸力 F_0 をパラメータとして示したものである。締結直後から急激に軸力が低下し、やがて一定軸力に安定する傾向を示している。同図によれば初期軸力 F_0 が大きいほど軸力低下量 F_R も大きい。

以下の実験結果ではこの締結終了後の軸力低下量をもって式(7)および式(8)の軸力低下量 F_R の実験値とみなした。このとき、軸力低下が安定化したことは曲線の傾きによって判定した。ほぼ10秒程度で初期軸力低下は安定化する。

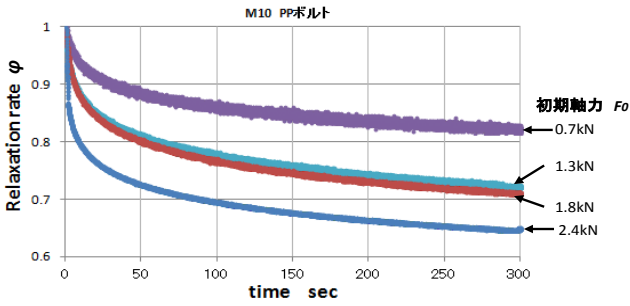


Fig.5 Non-rotational self-loosening of PP bolts

4.2 初期軸力 F_0 の影響

初期軸力 F_0 が軸力低下比 ϕ に及ぼす影響を Fig. 6 に示す。図中の実線は実測データに対する近似線である。初期軸力 F_0 が大なるほど、その後の軸力低下量 $F_R(t)$ も大きい。

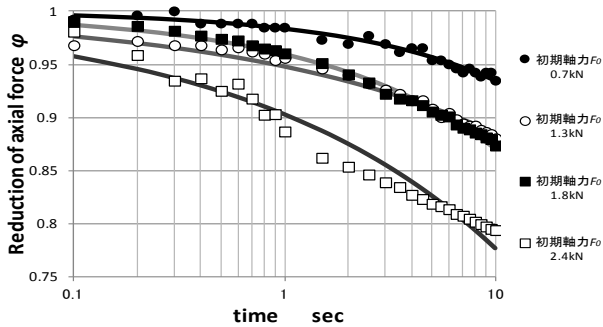


Fig.6 Influence of tightening force on reduction of axial force

4.3 締付け速度 $\dot{\theta}$ の影響

締付け速度 $\dot{\theta}$ が軸力低下比 ϕ に及ぼす影響を Fig. 7 に示す。図中の実線は実測データに対する近似線である。締付け速度 $\dot{\theta}$ が高いほど軸力低下量 $F_R(t)$ は大となる。

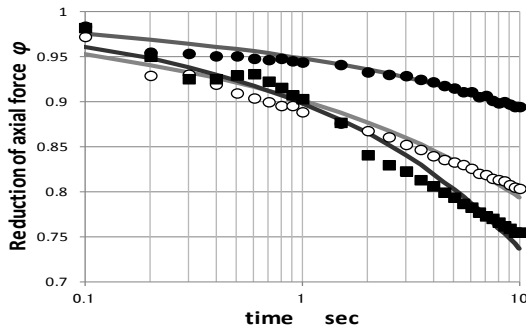


Fig.7 Influence of applied tightening speed on reduction of axial force

5. 考察

5.1 初期軸力 F_0 の影響

両対数グラフ Fig. 8 に軸力低下 F_R に及ぼす初期軸力 F_0 の影響を実験値とその直線近似により示す。図中の実験結果は直線近似可能な分布を示している。このことより式 (7) の特性が実験データに反映されていると考えことができ、傾きより式 (7) のべき乗部 k , 切片から乗数部 α が決められる。

Fig. 9 は Fig. 8 より求めた式 (7) のべき乗部 k と乗数部 α を示す。緩和係数 α は、初期軸力 F_0 に比例して増大し、PP 材および PC 材ともに同じ傾向で変化している。一方、べき乗部 k は初期軸力 F_0 の影響を受けずにほぼ一定であり、 $0 < k < 1$ の範囲にあり、材質の差だけが認められる。

また、Fig. 9 より、PP 材の緩和係数 α が PC 材より大きいのは、(6) において結晶性プラスチック PP の活性化エネルギー

$-Q$ が非晶性プラスチック PC より小さいためである。

以上より、応力緩和現象は式 (6), 式 (7) の緩和係数 α を通じて初期軸力 F_0 の影響を受けていることがわかる。

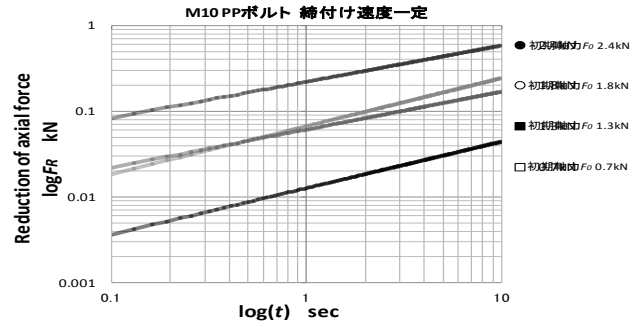


Fig.8 Influence of applied force on reduction of axial force under constant tightening speed

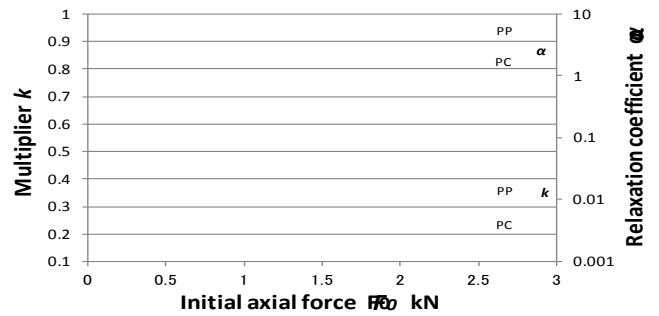


Fig.9 Experimental values of k and α in equation (7) under constant tightening speed

5.2 締付け速度 $\dot{\theta}$ の影響

両対数グラフ Fig. 10 に軸力低下 F_R に及ぼす締付け速度 $\dot{\theta}$ の影響を実験値とその直線近似により示す。同図もほぼ直線近似ができることから、式 (7) のべき乗部 k および緩和係数 α を求めることができ、その結果を Fig. 11 に示す。緩和係数 α は Fig. 9 とほぼ同傾向を示している。べき乗部 k については一部特異なデータがあるものの漸増傾向を示す。

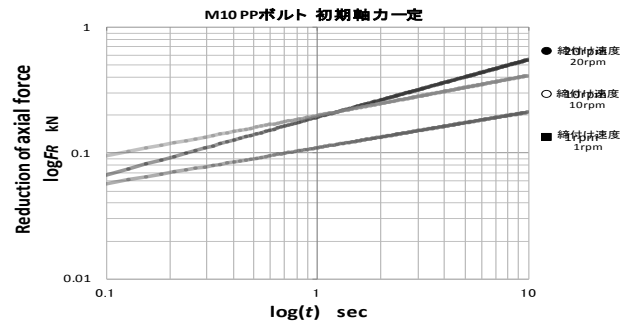


Fig.10 Influence of tightening speed on reduction of axial force under constant tightening force

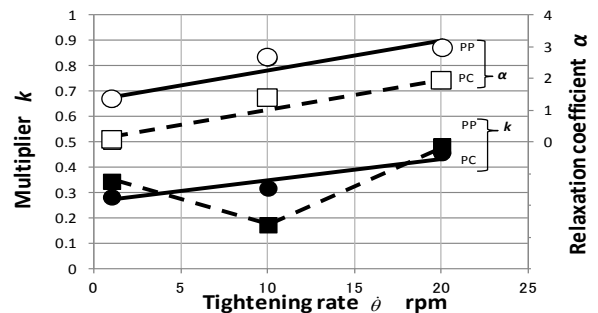


Fig.11 Experimental values of k and α in equation (7) under constant tightening force

以上から、応力緩和現象は式(6)、式(7)の緩和係数 a と乗数 k を通じて締付け速度 $\dot{\theta}$ の影響を受けていることがわかる。

6. FEM 解析

前章の考察はボルト全体が均一な応力状態であることを前提としていた。しかし実際にはボルトの円筒部、ねじ部、はめ合い部で異なる応力状態になると考えられる。特にナットとボルトがかみ合う領域においては応力分布が複雑であると想像される。より詳細な分布特性を明らかにするためにFEM解析を用いて解析した。

6.1 FEM 解析条件

ANSYS14.0を用いて、2次元と3次元のPPボルトのFEMモデルを作成した。2次元解析では、四辺形8節点要素を用いてモデルを作成し、120(deg)だけ締付けた時に生じる変位量をボルト頭部側座面とナット側座面に与えた。また、3次元解析では、四面体10節点要素と六面体8節点要素を用いてはめ合い部のモデルを作成し、ボルトを120(deg)回転させた。

6.2 FEM 解析の結果

Fig.12に2次元解析, Fig.13に3次元解析での軸方向の応力の結果を示す。Fig.12より円筒部およびねじ部ではほぼ均等な応力分布となっている。同図のはめ合い部におけるナットおよびボルトのかみあい状態下での軸方向の応力分布をFig.13に示す。Fig.13で明らかのように、はめ合い第一かみ合い部にて引張応力が集中していることがわかる。

ナット回転方向にとった締付け角度がFig.12の円筒部、ねじ部、はめ合い部の各引張応力に及ぼす影響をFig.14に示す。同図より、締付けの進行にともなう軸方向引張応力ははめ合い部のみにおいて急増するものの円筒部およびねじ部においてはわずかな上昇にとどまっている。

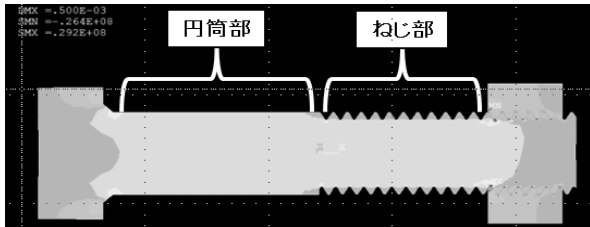


Fig.12 Stress distribution of bolted joint (2 dimensional FEM)

- ボルトの締結条件
- ・ナットの全自由度を固定
 - ・120degボルトを締付け

被締結体 ナット

ボルト



ナットとのかみ合い部

Fig.13 Stress distribution of mating area (3 dimensional FEM)

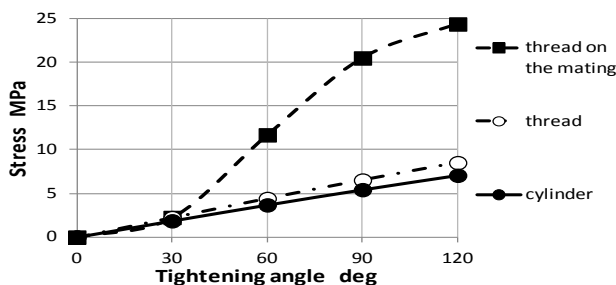


Fig.14 Calculated stress of mating area (PP bolt)

Fig.14から、締付け角度が増加するにともない、はめ合い第一ねじ軸部に生じる応力が大きくなった。ゆえに、はめ合い部第一ねじ領域において局部的に応力緩和現象が生じると考えられる。

6.3 FEM 解析の検証実験

前節での解析結果を検証するために、PPボルトのはめ合い部、ねじ部、円筒部のひずみをひずみゲージをボルトに挿入して実測した。

実測ひずみとFig.3の弾性係数を用いて求めた応力をFig.15に示す。同図よりはめ合い第一ねじ軸部において応力が集中していることがわかり、Fig.14の解析結果とほぼ一致している。

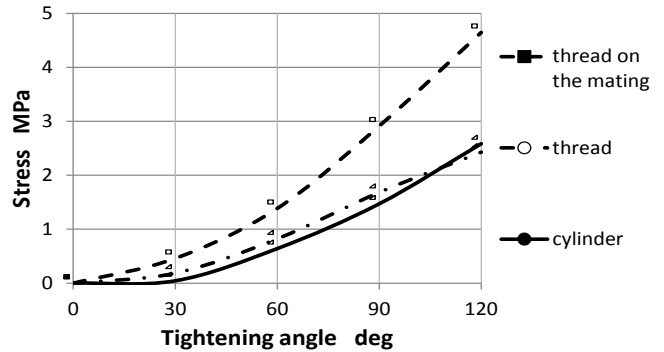


Fig.15 Measured stress of mating area (PP bolt)

7. 結言

プラスチックボルトの非回転ゆるみに及ぼす応力緩和現象の解明を目的として理論解析と実験を行った。結果は以下のようにまとめることができる。

- (1) 応力緩和現象に基づく非回転ゆるみは、締付け条件、すなわち初期軸力と締付け速度の影響を受ける。
- (2) FEM解析によるとプラスチックボルトの締結時における応力の発生は、はめ合い第一ねじ軸部に集中し、局部的に応力緩和現象を発生させている。
- (3) 結晶性材料のボルトは非結晶性材料のボルトに比べ非回転ゆるみが大きい。
- (4) 応力緩和による非回転ゆるみモデルを明らかにした。
- (5) 応力緩和による非回転ゆるみモデルの有効性を示すことができた。これより、プラスチックボルトの締付けにあたっては、応力緩和現象に基づく非回転ゆるみを抑制するために、初期軸力により発生する初期応力をなるべく小さくし、また締付け速度を低くすることが重要となる。初期応力を小さくするためには座金を有効に使うなどが考えられる。

今後の展望として、プラスチックは熱による影響も強く受けるため、応力緩和現象の温度特性による影響を考慮した軸力低下について検討することが課題である。

参考文献

- (1) 成澤郁夫, プラスチックの機械的性質, シグマ出版, 東京 (1994)
- (2) G. Gerstmayr, W. Eichlseder, Creep and Relaxation behavior of Self-tapping Al-bolts in Mg Die cast Alloys for Power train Components