論文

改良型二重ねじボルトの転造加工と性能評価

— 並一条・並多条二重ねじ機構に基づく緩み止め

ボルト締結体の開発に関する研究 第2報 —

新仏 利仲* 天野 秀一* 竹増 光家**

志村 穰*** 坂本 誠**** 桑原 利彦*****

Thread Rolling and Performance Evaluation of Modified Double Thread Bolt

— Study on Development of Antiloosening Bolt Fasteners Based on

Coarse-Single Coarse-Multiple Double Thread Mechanism, 2nd Report —

Toshinaka SHINBUTSU *, Shuichi AMANO *, Teruie TAKEMASU **,

Jyo SHIMURA ***, Makoto SAKAMOTO **** and Toshihiko KUWABARA *****

(Received on July 4, 2017)

The previous study revealed that the new double thread bolts composed of a coarse single thread and coarse multiple threads (called DTB-II) have poor thread rolling formability and insufficient tensile strength. In this study, we developed two modified types of 3-thread DTB-II called 3-1 thread DTB-IIB and DTB-IIC: one thread was removed from the triple threads for both DTBs and the height of the multiple thread root-diameter was raised by half in the latter case at the point where a single thread was traversed by the bottom of multiple threads. The FEM thread rolling simulations were first performed using dedicated dies having a groove that followed the same outline as the thread profile of the modified DTBs. Both modified DTBs were rolled precisely and the thread heights reached the target level at any cross section. The actual forming states in the thread rolling experiments well reproduced the FE-simulation results. The performance evaluation tests demonstrated that the 3-1 thread DTB-IIC, even with a single-nut structure, has a practically sufficient tensile strength, and the fatigue strength and the antiloosening performance of both DTBs clearly exceed that of the conventional DTB-I composed of a coarse single thread and a fine single thread.

Key words: form rolling, die design, workability, FEM, tensile test, bolt fastenings, double thread mechanism, thread rolling, failure mode, loosening test.

1. 緒言

筆者らは前報¹⁾において、従来型的一条並目ねじと一条

細目ねじから構成された二重ねじ機構に基づくボルト締結体²⁾(DTB-Iと呼ぶ, DTB: Double Thread Boltの略)の細目ねじにまつわる種々の問題を根本的に解決するために、一条並目ねじと多条並目ねじから構成された新型二重ねじ(DTB-IIと呼ぶ)を考案した。そして、多条並目ねじの条数を2条, 3条および4条の3種類に設定し、それらの転造成形性および引張り強度や緩み止め性などの比較評価を行った。その結果、最も一般的な対向する2つのダイスで転造する場合、DTB-IIは条数により変化するねじ山断面積の円周方向周期が成形性に大きな影響を及ぼした。特に、その周期が180度3条のDTB-IIは、両ダイスが同じ押込み量を転造中常に維持できるため、工具溝への材料充填状態が最も良好であった。また、DTB-IIの引張強度は多条ね

* (株)ニッセー 〒409-0502 大月市富浜町鳥沢 2022 番地

Nissei Co., Ltd., 2022 Torisawa, Tomihamamachi, Otsuki 409-0502, Japan.

** 公立諏訪東京理科大学工学部機械電気工学科 〒391-0292 茅野市豊平 5000-1

Department of Mechanical and Electrical Engineering, Tokyo University of Science, Suwa, 5000-1 Toyohira, Chino 391-0292, Japan.

*** 東京工業高等専門学校機械工学科 〒193-0997 八王子市梶田町 1220-2 Faculty of Engineering, National Institute of Technology, Tokyo College, 1220-2 Kunugida-machi, Hachioji 193-0997, Japan.

**** 東京都立産業技術高等専門学校 生産システム工学コース

〒140-0011 品川区東大井 1-10-40

Production Systems Engineering Program, Tokyo Metropolitan College of Industrial Technology, 1-10-40 Higashi-oi, Shinagawa 140-0011, Japan.

***** 東京農工大学大学院 工学研究院 先端機械システム部門

〒184-8588 小金井市中町 2-24-16

Division of Advanced Mechanical Systems Engineering, Tokyo University of Agriculture and Technology, 2-24-16 Nakacho, Koganei 184-8588, Japan.

じの条数が増加するにつれて低下し、3 条以上ではダブルナット状態でもねじ山がせん断破壊 (いわゆる “ねじ抜け”³⁾) した。これは、DTB-II は基本となる 1 条ねじのつる巻線が、ねじ 1 周当たり多条ねじの条数から 1 減じた本数の溝により等間隔に飛び石状に分断され、耐ねじ抜け性が分断されたねじ山のせん断破壊強度、すなわちその長さにより決まるためである。一方、ユニカー式振動試験⁴⁾の結果から、DTB-II の耐振動緩み止め性は DTB-I のそれより優れていることが分かった。

前述の研究を進展させて、さらに筆者らは DTB-II の引張強度の改善を図り、実用性を高めるために、ねじ部の構造を大幅に改変した。その方策としてまず、 n 条 ($n=2, 3, 4$) の各 DTB-II に対し、多条ねじの条数を $n-1$ 以下の範囲で選択的に減じた数種類の改良型を考案し、それらを切削加工により製作して引張試験を行った。その結果、いずれの DTB-II も条数を 1 以上減ずれば、ダブルナット装着状態ではねじ抜けによる破壊をほぼ完全に防止できることが分かった。次に、この改変が転造成形性に及ぼす影響を検証するために、FEM によるねじ転造シミュレーションと加工性実験を行い、ねじ部の構造上の問題点を見いだした⁵⁾。さらに、それらの課題を解決し、製品品質や工具寿命の向上を図るため、多条のねじ溝形状にも改良を加えた改良型の考案開発も行った⁶⁾。

本報ではそれらの成果を踏まえ、前報¹⁾において転造成形性が最も良好であった 3 条 DTB-II の改良型 2 種類を研究対象として選定し、それらのねじ転造解析および実験結果を最初に示す。次に、引張りや動的疲労などの強度評価試験と振動緩み試験の結果からそれらの総合的性能を評価し、通常のシングルねじや従来型 DTB-I と比較することにより実用可能性を検証する。

2. 改良型 DTB-II のねじ部の構造

Fig. 1 に前報¹⁾で考案した 3 条 DTB-II、および新たに考案した 3 種類の改良型のねじ部の構造を比較して示す。また、Fig. 2 に本報で開発対象とした 2 種類の改良型の各角度位置におけるねじ山断面形状を、Fig. 3 に各種 3 条 DTB-II のシングルねじ 3 ピッチ分のねじ山断面面積比の変化を各々比較して示す。改良の方策としてまず、並目 1 条ねじに重畳させる Fig. 1(a) の 3 条ねじ溝から、同図(b)に示すように 1 条を間引くことにより (3-1 条 DTB-IIA または DTB-IIA と呼ぶ)、どの角度位置断面でも 3 ピッチに 1 つ以上の完全なシングルねじ山が残るようにした。これにより、Fig. 3 からねじ山断面面積比の最小値は 3 条 DTB-II のその約 1.6 倍になったが、90 度および 270 度位置でのねじ底には 4 つ連続した微小ねじ山が残り、この領域近傍はねじ抜けの起点となる可能性が高いため、DTB-IIA は開発対象から外した。そこで、第 1 の改良型として、Fig. 1(c)に示すように残った 2 条溝のうち的一方を半ピッチずらし等ピッチに並べた (3-1 条 DTB-IIB または DTB-IIB と呼ぶ)。その結果、Fig. 2 に示すように 90 度位置でも微小ねじ山は 2 つに減少し、また、Fig. 3 からねじ山断面面積比の分布は 90 度周期で変化するため DTB-IIA に比べより均一になり、その最小値は 70%と 3 条 DTB-II のその 2 倍に達した。

しかし、DTB-IIB でも依然としてどの角度位置にもねじ

Fig. 1 Sketch of multithread DTBs

Fig. 2 Thread profiles in each angular position for 3-1 thread DTB-IIB and DTB-IIC

Fig. 3 Cross-sectional area ratios of thread at each angular position of various 3 thread DTB-IIs

底部にはせん断破壊しやすい微小ねじ山が残存し、それらはねじの引張強度低下の原因になると考えられる。そこで、第2の改良型では Fig. 1(d)に示すように、並目1条のねじ山と干渉する多条ねじ溝の谷底部分を底上げした(3-1条DTB-IICまたはDTB-IICと呼ぶ)。これにより、Fig. 2に示すように、どの角度位置においてもねじ底部から微小ねじ山は完全に消失し、さらにねじ山断面積比の最小値も85%と、DTB-IIBのそれに比べさらに15%増加しており、ねじの引張強度や動的疲労強度のさらなる改善が期待できる。

3. 解析および実験方法

3.1 ねじ転造シミュレーションおよび実験

前述の理由から、本報ではM12の3-1条DTB-IIBおよびDTB-IICを開発対象としたが、これらのねじは前報¹⁾の3条DTB-IIに比べ構造がより複雑で、ねじ山形状は円周方向ばかりでなく、軸方向にも周期的に変化する。そのため、それらを量産するための転造工程において、材料流動や最終成形状態は従来のDTBに比べかなり差異があると考えられる。そこで本報ではまず前報¹⁾同様、上記2製品の3次元FEMモデルによるねじ転造シミュレーションを行い、転造可能性や成形上の問題点に関する説明を試みた。

解析は汎用の弾塑性静的陰解法FEMソフトSimufact forming ver.13.0を用いた。Fig. 4にFEMモデルを示す。いずれの製品ねじ山も軸方向に1条ねじ3ピッチの周期で変化するので、ここではその3倍の約9ピッチ分の円柱状素材を解析領域とした。Fig. 4(a)に直径 $\phi 10.8$ mmの素材の初期FEMメッシュを示す。素材の同心軸上に内径 $\phi 8$ mm、外径 $\phi 14$ mmの中空円筒状リファインメントボックス(指定した領域を細かくメッシングする機能)を配置し、その領域を参照サイズ約0.4 mmの6面体要素で分割した。これに同図(b)に示すように、実験で用いた丸ダイス工具と同じ製品ねじ山を転写した溝形状を加工面にもつ、長手方向に傾斜のない2つの対向する平ダイス工具を上下から押し当て、同図(c)に示すように矢印の方向に同一速度で移動させながら押し込むことにより加工を行った。つまりこの平ダイス工法は、直径無限大の丸ダイス工法と同等であり、これにより工具との接触面積が増大するため素材の転がり方向の保持状態が安定し、計算エラーの発生が抑制され、計算時間を大幅に短縮できた。加工条件として、加工開始から素材8転がりまでは上下の工具を一定速度で規定量 $\delta_{\max}$ だけ押し込み(DTB-IIBでは $\delta_{\max}=0.56$ mm, DTB-IICでは $\delta_{\max}=0.62$ mm)、その後2転がりのドウェル工程を経て、最後の2転がりで工具を完全にリリースさせた。工具と素材の接触界面においてクーロン摩擦(摩擦係数0.2)を仮定した。素材の変形抵抗曲線として、実際のねじ素材(SS400材)から削り出した直径 $\phi 10$ mm、高さ20 mmの円柱状素材を単軸圧縮試験して得られた、次式を用いた。

$$\bar{\sigma} = 960(\bar{\varepsilon} + 0.0177)^{0.205} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{\sigma}$ は相当応力、 $\bar{\varepsilon}$ は相当塑性ひずみであり、式(1)は $\bar{\varepsilon}=0.0\sim 0.7$ の範囲で近似した。なお、転造で加わる素材表面層の塑性ひずみは後述するように非常に大きくなるが、今回の解析ではこの式をそのまま用いた。

Fig. 4 FEM simulation model of multitread DTB

ねじ転造実験は、前報¹⁾同様上記2製品の周期的に変化するねじ山を転写した溝形状をもつ専用丸ダイス工具(以後単に工具と呼ぶ)2個を、油圧式精密ねじ転造盤((株)ニッセイ製FA-16U)の左右の工具軸に各々取り付け、寄せ転造により行った。加工条件は、工具回転速度62 rev./min、転造時間4秒、ドウェル時間1秒とし、素材の初期直径と工具押し込み量はねじ山の成形状態を見ながら適宜調整した。ねじの素材はSS400材である。

3.2 強度評価および振動緩み試験

上記で転造された2種類のDTBの引張強度試験を、(株)島津製作所製オートグラフAG-25TBにFig. 5に示す専用の治具(試験片を引張荷重方向に自動調心できる)を取付けて行った。試験片の首下長さは110 mm、ねじ部長さは60 mmとした。ただし、いずれの試験片もダブルナット状態では通常のシングルねじボルト同様母材破断し、最大荷重もほとんど差がなかった。そのため高さを3通り(通常高さ(10 mm)、1.25倍高さ(12.5 mm)、1.5倍高さ(15 mm))に変えたシングルねじナットのみを装着し、ねじ抜けしない条件を求めた。引張速度は2 mm/minで一定とした。

次に、それらDTBの軸力疲労試験による動的強度評価を(株)島津製作所製サーボパルサーEHF-E100kNを用いて行った。試験片は引張試験と同じ専用治具にダブルナット状態で取り付けた。平均応力230 MPa、周波数10 Hzの条件下で、 2.0×10^6 回の繰り返しに耐える最大応力振幅を疲

労限度として求め、シングルねじの結果と比較した。

最後に、DTB にとって具備すべき最も重要な性能である振動緩み止め性を、前報¹⁾同様ドイツ工業規格 DIN65151/25201 に準拠した Fig. 6 に示す Vibrationmaster 社製ユンカ

Fig. 5 Tensile strength and tensile fatigue test rig

Fig. 6 Junker vibration loosening test apparatus

一式⁴⁾振動緩み試験機 J102 を用いて評価した。試験片は上記の転造された M12 の DTB-IIB および DTB-IIC と従来型 DTB-I であり、首下のねじ部長さを 60 mm とした。試験条件は横変位量 $\epsilon = \pm 0.7$ mm, 振動数 $f = 12.5$ Hz (本試験機において設定可能な最も厳しい条件) とし、既定の負荷繰返し数 $N = 2000$ サイクルまで軸力の変化を計測した。

4. 結果および考察

4.1 ねじ転造シミュレーションおよび実験結果

Fig. 7(a)~(d)および Fig. 8(a)~(d)に FEM シミュレーションにより得られた DTB-IIB および DTB-IIC の各工具押込み量 δ におけるねじ山成形状態に伴う相当塑性ひずみ $\bar{\epsilon}$ の分布の推移を、Fig. 7(e)および Fig. 8(e)に転造実験で得られたそれら製品の外観写真を各々示す。

また、各 DTB の FEM 解析により得られた各 δ における代表的角度位置のねじ軸断面に対応するシングルねじ 3 ピッチ分の工具溝への材料充填状態の推移を Fig. 9(a)と(b)に比較して示す。いずれの DTB も最終的なねじ山成形状態は解析と実験でよく一致しており、十分な高さの狙い通りの形状が全周にわたり得られている。また、解析結果より転造途中のねじ山もほぼ想定通りに成形が進行している。これは、本報で開発対象とした 2 種類の改良型 DTB はともにねじ山断面積比が 90 度周期で変化するため、最も一般的な対向する 2 つのダイスで転造加工する場合、前報¹⁾の 3 条 DTB-II の場合と同様、左右の各ダイスと素材の接触面積が等しく、両ダイスが素材に対して同じ押込み量を転造中常に維持でき、素材軸心がブレにくいためである。

次に、成形中の $\bar{\epsilon}$ の分布を両 DTB で比較すると、DTB-IIB では 0 度位置から 90 度おきにシングルねじ山を多条ねじ溝が分断し、そのねじ溝底部近傍で $\bar{\epsilon} \approx 15$ と非常に高くなっている。それに比べ DTB-IIC の $\bar{\epsilon}$ は全体的に低く、その最大値も $\bar{\epsilon} \approx 6.5$ と DTB-IIB の半分以上になっている。室温 20 °C で行った実際のねじ転造実験においても、DTB-

Fig. 7 Equivalent plastic strain distributions of 3-1 thread DTB-IIB during thread rolling calculated by FEM, and final product of analysis and experiment

Fig. 8 Equivalent plastic strain distributions of 3-1 thread DTB-IIC during thread rolling calculated by FEM, and final products of analysis and experiment

(a) 3-1 thread DTB-IIB $\delta_{\max} = 0.56$ mm

(b) 3-1 thread DTB-IIC $\delta_{\max} = 0.64$ mm

Fig. 9 Filling-up state in each section of die groove calculated by FEM simulation

IIB の加工直後の素材温度は約 110 °C であったのに対し、DTB-IIC のそれは約 70 °C まで低下していた。その理由は Fig. 9(a)より、DTB-IIB では 0 度位置の中央および 90 度位置の右側にある 2 つの浅い工具溝は、 $\delta = 0.28$ mm ($\delta_{\max}$ の半分) で既に充填が完了しており、これらの部分はその後加工で常に過転造状態になるためである。また、早期に成形が完了したねじ山近傍の材料は、同一の 1 条ねじつる巻線上で未充填のより深い溝へ流されるようになるが、こ

の円周方向の材料流動には大きなせん断変形が伴うため、材料剥離や工具寿命の悪化につながり望ましくない。一方、DTB-IIC の場合、 $\delta_{\max}$ の約 70% ($\delta \approx 0.44$ mm) までは通常のシングルねじと全く同じ状態でねじ山成形が進行するため、材料は主に半径方向にのみ盛り上げられ、角度位置による成形状態の差は生じない。その後は Fig. 9(b) の 0 度位置の中央および 90 度位置の右側にある浅い台形状の溝は充填が完了するため、円周方向への材料流動が発生するが、その量は DTB-IIB の場合に比べ少なく、 $\bar{\epsilon}$ が過度に高くなる箇所は存在しない。さらに、Fig. 9 の結果から各角度位置の工具溝への材料充填率を計算すると、いずれの DTB も転造途中は溝断面積が最小の 45 度位置でその値がやや高くなるが、 δ が $\delta_{\max}$ の 75% を超える辺りから、円周方向への材料流動が増大するため、角度位置による充填率の差異は急激に縮小していた。以上の結果より、特に DTB-IIC は過転造になる箇所が少なく、半径方向の材料流動が支配的であるため、前報 1) の 3 条 DTB-II に比べ転造成形性が大幅に向上したといえる。

4.2 引張強度試験結果

2 種類の改良型 DTB に高さを変えたシングルねじナットを装着して引張試験を行った場合の試験後の外観写真を Fig. 10(a)~(c) に、それらの荷重-ストローク線図の比較を Fig. 11 に各々示す。これらの試験はいずれも 3 回ずつ行い、全て同一の結果が得られた。図より、DTB-IIB は 1.25 倍高さのナット装着状態ではねじ抜けしたが、1.5 倍高さのそれでは母材破断した。一方、DTB-IIC は 1.25 倍高さのナット装着状態では母材破断し、通常高さのナットの場合はねじ抜けしたが、その時の最大荷重は母材破断した時の約 90% (47 kN) に達している。M12 標準ねじの軸力の最小値と最大値は各々 14 kN および 25 kN である⁷⁾。DTB-IIC はそれらを十分超える軸力強度を有するので、通常ナット高さでの使用も問題ないといえる。

以上の結果より、本報で考案した DTB はいずれも前報の 3 条 DTB-II に比べ引張強度が格段に向上した。これは、

Fig. 10 Tensile strength test results

Fig. 11 Stroke-load curves in tensile tests

条数を減じかつ多条ねじ溝を等ピッチに配置することにより、ねじ山断面積比を均一にした効果が明確に現れたためである。さらに DTB-IIC は、ねじ溝底部の微小ねじ山も消失したことにより、通常のシングルねじにほぼ匹敵する引張強度が得られた。

4.3 動的疲労試験結果

軸力疲労試験により得られた $S-N$ 線図の比較を Fig. 12 に、破断した各 DTB の外観写真を Fig. 13 に各々示す。切削シングルねじ (CS) および転造シングルねじ (RS) の各ボルトの疲労限は各々 65 MPa および 90 MPa で、ほぼカタログ値通り⁸⁾である。一方、ダブルナット装着状態で試験した DTB-IIB や DTB-IIC は、緩み止め機能が備わっていることから時間疲労強度も疲労限も RS のそれより向上し、双方の疲労限はいずれも 97.5 MPa で、従来型 DTB-I の疲労限(100 MPa)⁴⁾にかなり近づいた。ところで、DTB-IIB の場合のねじの破断は全て Fig. 13(a)に示すように、内側多条ナットの第 1 ねじ山とかみ合うねじ底から亀裂が入り起きたのに対し、DTB-IIC の場合の破断は全て Fig. 13(b)に示すように外側シングルナットの第 1 ねじ山とかみ合うねじ底から亀裂が入り起きた。その理由は、DTB-IIC では内側の

Fig. 12 $S-N$ curves in tensile fatigue tests

(a) 3-1 thread DTB-IIB

(b) 3-1 thread DTB-IIC

Fig. 13 Fractured DTBs in tensile fatigue test

多条ナットはねじの疲労強度に最も強く影響するねじ溝底部とはかみ合っておらず、また、外側のシングルねじナットとかみあうボルトの有効径以下の部分のねじ溝形状が、シングルねじのそれと同一であるためである。

4.4 振動緩み試験結果

振動緩み試験における各種ボルト締結体の負荷振動繰返し数に対する軸力の変化を Fig. 14 に示す。ここで、多条 DTB は後で装着するシングルナットの締付けトルクのみを加減することにより、初期締付軸力 P_0 を適宜調整した。

Fig. 14 Variation in the axial tension in Junker's vibration loosening tests

ただし、JIS の強度区分 4.8 におけるねじの呼び M12×1.75 に対する適正締付軸力は約 20 kN であるが、本報の改良型 DTB はいずれも軸力維持性能が高く、規定の軸力で締め付けた場合は、軸力がほとんど落ちないまま振動が加わるため、試験中にボルト頭軸部がせん断破壊した。そこでここでは P_0 をやや低めの 17~18 kN の範囲で設定したときの結果を示す。また、比較のため行った従来型 DTB-I の振動緩み試験では、前報¹⁾同様並目ナットと細目ナットを各々規定軸力になるよう締め付けた後、正規の仕様手順通り内側ナットを戻し回転させた場合 (DTB-Ia) とさせない場合 (DTB-Ib) の二通りで試験を行った。その結果、図に示すようにいずれの DTB でも規定繰返し数まで軸力は残留している。しかし、試験後の軸力残留率は DTB-Ia が約 15%、DTB-Ib が約 10%であるのに対し、DTB-IIB と DTB-IIC はともに約 90%で、DTB-I に比べて圧倒的に高く、DIN25201 で規定されている良否判定の基準値である 80%を満足している。軸力の変化を比較すると、DTB-I はいずれも試験開始直後に約 4 kN 一気に減少し、その後 DTB-Ia はほぼ一定の傾きで減少を続けるのに対し、DTB-Ib は 300 サイクル付近までは急激に減少し、その後は比較的緩やかに減少している。一方、本報の改良型 DTB-II はいずれも約 1kN の初期緩みの後は極めて緩やかに漸減している。DTB-I と改良型 DTB-II の間にこのような顕著な差が現れた理由として、内側ナットと外側ナットの緩み速度比が前者は 2:1 であるのに対し、後者は 3:1 と大きくなっていること、また、前者は軸力保持を主に担う外側の細目ナット (通常パワーナットと呼ばれる) が、並目ねじ山の頂上付近に部分的にある浅い細目ねじ溝により保持されているが、後者はそれが並目ねじ溝により強力に保持されていることなどが挙げられる。しかし、詳細な現象説明は今後の課題である。

以上の結果から、DTB-IIB と DTB-IIC は外側ナットの締め付けトルクを管理するだけで、規定の繰返し負荷回数の間、軸力を安定して保持できることが分かり、その振動緩み止め性の高さが立証された。また、従来型 DTB-I の抱えていた、内側ナットと外側ナットを異なる締め付けトルクで別々に管理しなければならないという、締結手順の煩雑さを回避できたといえる。

5. 結 言

前報¹⁾の 3 条 DTB-II の改良型 2 種類を考案し、その転造成形シミュレーションと実験、静的および動的引張強度や振動緩みなどの性能評価試験結果から以下の知見を得た。

- (1) 本報で開発対象とした改良型 DTB-II はいずれも、ねじ山断面形状が 90 度周期で変化し、2 つの転造ダイスが素材に対して同じ押込み量を転造中常に維持できるため、転造成形性が良好であり、狙い通りの十分な高さのねじ山が全周にわたり成形された。また、3-1 条 DTB-IIC の転造では全工具押込み量の約 70%まで通常のシングルねじと同じ状態で成形が進むため、結果的に 3-1 条 DTB-IIB に比べ過転造域が減少し、加工直後の素材温度が大幅に低下した。
- (2) 引張り強度試験の結果、3-1 条 DTB-IIB では 1.25 倍高さのシングルナットを、DTB-IIC では通常高さのシングルナットを装着した状態で、実用強度の 14~25kN を十分上回る引張り強度を有した。また、いずれの改良型 DTB-II も動的疲労強度は同等であり、シングルねじボルトのそれを約 8%上回った。
- (3) ユンカー式振動試験の結果、3-1 条 DTB-IIB と DTB-IIC はいずれも高度な緩み止め性能を実現し、外側ナットの締め付けトルクのみを管理するだけで規定の 2000 cycle 負荷繰返し後も軸力残留率は 90%以上を保持した。

参 考 文 献

- 1) Shinbutsu, T., Amano, S., Takemasu, T. & Kuwabara, T.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **58**-676 (2017), 404-410.
- 2) Takemasu, T., Miyahara, H., Shinbutsu, T., Nishida, S., Noda, N. & Noda, H.: J. Jpn. Soc. Technol. Plast., **47**-540 (2006), 44-48.
- 3) Sakai, T.: Zoho-Neji-Teiketsu-Gairon, (2003), 44-72, Yokendo Ltd.
- 4) Junker, G.H.: SAE Trans, **78** (1969), 314-335.
- 5) Shinbutsu, T., Amano, S., Takemasu, T. & Kuwabara, T.: Proc. 67th Jpn. Joint Conf. Technol. Plast., (2016), 275-276.
- 6) Shinbutsu, T., Amano, S., Takemasu, T., Shimura, J. & Kuwabara, T.: Proc. 2017 Jpn. Spring Conf. Technol. Plast., (2017), 93-94.
- 7) Tohnichi Torque Handbook, **8**(2014), 28-39. Tohnichi Mfg. Co., Ltd.
- 8) Nishida, S.: Failure Analysis in Engineering Applications, (1992), 68-104, Butterworth-Heinemann Co., Ltd.