

技術寄稿（第7回）

「ねじ締結の原理と締結信頼性の向上」

（その②）：トルク法におけるねじ締付け特性値の
測定と分析）

◇寄稿者

東京都立大学 システムデザイン学部

システムデザイン学科 客員研究員

工学博士 晴山 蒼一 氏

技術寄稿「ねじ締結の原理と締結信頼性の向上」

(その②)：トルク法におけるねじ締付け特性値の測定と分析

東京都立大学
晴山 蒼一

本稿は、ASME IMECE 2016 講演論文⁽¹⁾および日本機械学会論文集^(2,3)などに掲載された小生の「ねじ締結の信頼性向上」に関する論文に加筆修正し解説するものです。

1 トルク法の原理⁽¹⁻³⁾⁽⁴⁾

前報⁽⁴⁾で解説したように、ボルトの締付けは締付けトルク T と軸力 P に関する斜面の力学である。レンチなどを用いて目標締付けトルクを目指して締付けるが摩擦係数や工具の管理状況の影響で締付け完了時（トルクの最大値）でボルトに生じる軸力は図 1 の赤丸●の位置に来る。この時締付けトルク T と軸力 P の関係は一般的には式(1)で示される。

$$T = KPd \tag{1}$$

ここで、 T ：締付けトルク、 K ：トルク係数（ナットファクターと呼ばれることもある）、 d ：ねじの呼び径

トルク係数 K はねじ締付け特性値の一つであり、トルク係数 K が大きくなると（摩擦が大きくなる） $T = KPd$ で示される直線の傾きは小さくなり、逆にトルク係数 K が小さくなると（摩擦が小さくなる）と傾きは大きくなる性質を持っている。

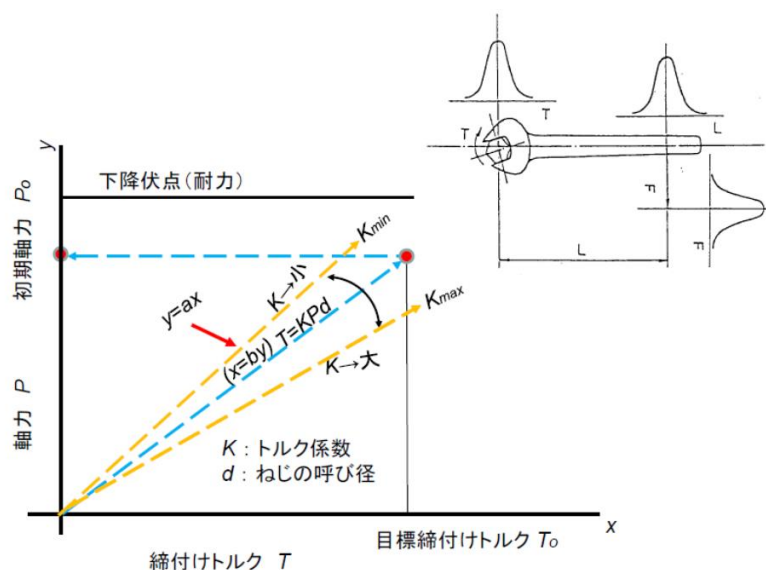


図 1 1本のボルトの締付け

一方、工場などの作業現場における多数のボルト締付けでは、赤丸●の位置は図2のハッチングで示すような菱形の領域にばらついてくる。すなわち、ねじ締付け特性値はこのように多くのねじ締結では一般的には、ばらつきを持ったものとなる。この菱形の領域が締付け時に降伏軸力に対しねじ締結体への外力の許容範囲を満たしていること、また菱形の領域の下限値がゆるみに対して十分な余裕があることが必要である。さらに図2には、トルク法によるねじ締結の留意事項についても示した。

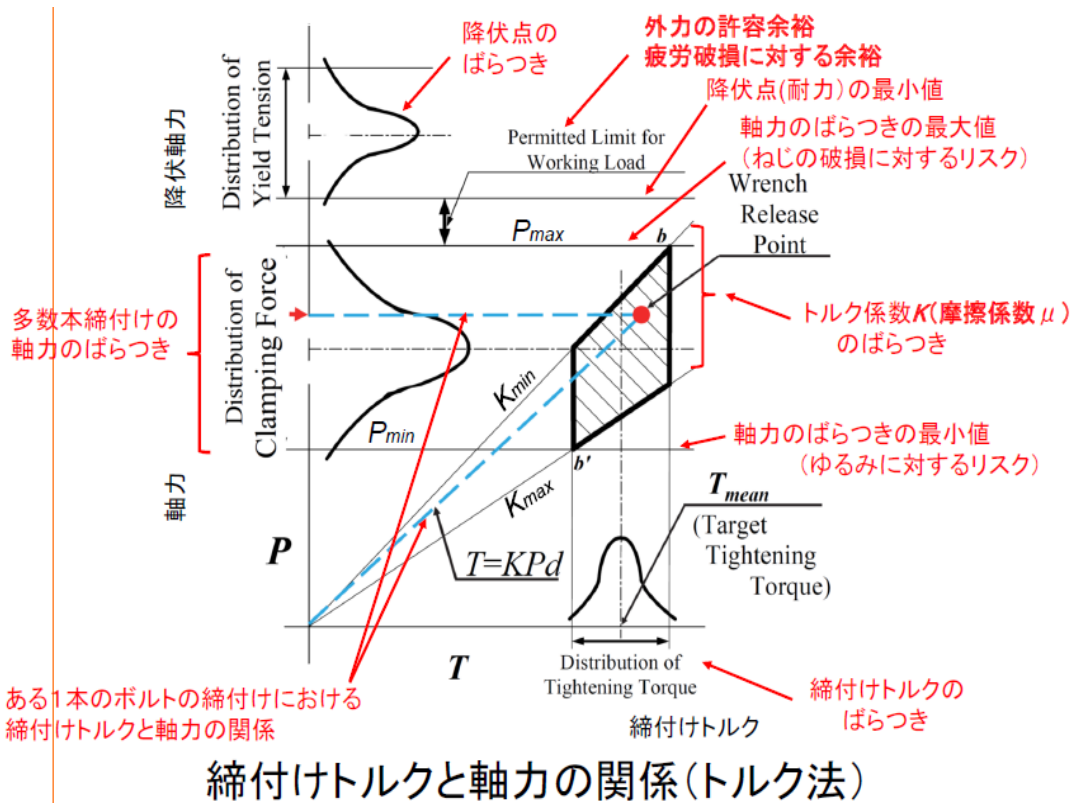


図2 多数のボルト締付けにおける締付けトルクと軸力の関係

三角ねじではトルク法の基礎式は前報にも示した通り、式(2)のように示すことができる。

$$T = \left(\frac{d_2}{2d} \mu_s \sec \alpha + \frac{d_2}{2d} \tan \beta + \frac{d_w}{2d} \mu_w \right) Pd$$

$$= (K_1 + K_2 + K_3)Pd = T_1 + T_2 + T_3 \quad (2)$$

ここで、 P ：締付け力（軸力）、 d ：ねじ呼び径、 d_2 ：ねじの有効径の基準寸法、 d_w ：ナットの等価座面直径、 μ_s ：ねじ山側面間の摩擦係数、 μ_w ：座面の摩擦係数、 α ：ねじ山の半角、 β ：ねじのリード角、 K_1 ：ねじ山側面間トルク係数、 K_2 ：軸力トルク係数、 K_3 ：座面トルク係数、 K ：トルク係数、 T_1 ：ねじ山間の摩擦に費やされるトルク、 T_2 ：軸力発生に寄与するトルク、 T_3 ：座面間の摩擦に費やされるトルク

この中で、 μ_s , μ_w , K_1 , K_2 , K_3 などもねじ締付け特性値であり、やはり多数本の締付けではばらつきを持った値となる。なお前報で示した通り、 μ_s と μ_w が同じ摩擦係数値を取るとしたときの総合摩擦係数 μ は式(3)で示される。

$$\mu = \frac{2Kd - d_2 \tan \beta}{d_2 \sec \alpha + d_w} \quad (3)$$

2 ねじの破損条件

よく知られているように、ねじのように伸びのある中炭素鋼のような材料の破損は、せん断ひずみエネルギー説に従うとする場合が多い。その場合、等価（引張）応力と軸応力・せん断応力の関係は次式で示される。

$$\begin{aligned} \sigma_e &= \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \\ &= \psi_e \frac{T}{A_s \cdot d} \end{aligned} \quad (4)$$

ここで、 σ ：ボルト軸部に生じる軸応力、 τ ：ボルト軸部に生じるせん断応力、 A_s ：ボルトの有効断面積、 ψ_e ：等価（引張）応力係数

$$A_s = \frac{\pi}{4} d_s^2, \quad d_s = \frac{d_2 + d_3}{2}, \quad d_3 = d_1 - \frac{H}{6} \quad (5)$$

ここで、 d_s ：ボルトの有効径、 d_3 ：ボルトの谷の径、 H ：とがり山の高さ($0.866025p$)、 p ：ピッチ、 d_1 ：ボルトの谷の径の基準寸法

ボルトの締付け時にボルトのねじりに消費されるトルク（ボルト軸部ねじりトルク） T_s は次式で示される。

$$\begin{aligned} T_s &= T_1 + T_2 = (K_1 + K_2)P \cdot d \\ &= K_s \cdot P \cdot d = \eta \cdot T \end{aligned} \quad (6)$$

ここで、 $K_s = K_1 + K_2$ ：ねじりトルク係数、 η ：ねじりトルク比($\eta = K_s/K$)

図 3 は池田ら⁽⁵⁾による締付けからゆるめに至る過程での締付けトルク T と軸力 P 及び軸部ねじりトルク T_s の関係を示したもので、与えた締付けトルクの内、締付けトルク最大の点 A で軸部ねじりトルク T_s は締付けトルク T から座面トルク T_3 を除いたものとなっていることを示している。

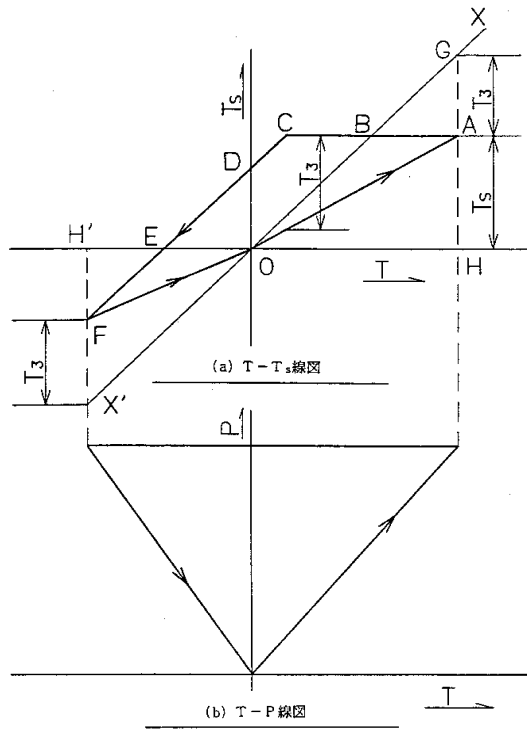


図3 締付けからゆるめに至る過程での締付けトルクと軸力及び軸部ねじりトルクの関係

式(3)に示した軸応力 σ 、せん断応力 τ および等価（引張）応力係数 ψ をねじ締付け特性値であるトルク係数 K およびトルク比 η などを用いて示すと、それぞれ式(7)、式(8)および式(9)で示すことができる。

$$\sigma = \frac{P}{A_s} = \frac{4T}{\pi d_s^2 \cdot d \cdot K'} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{16T_s}{\pi d_s^3} = \frac{16\eta T}{\pi d_s^3} \quad (8)$$

$$\psi_e = \sqrt{\left(\frac{1}{K}\right)^2 + 3\left(4\eta \frac{d}{d_s}\right)^2} \quad (9)$$

山本の解説⁽⁶⁾によると、式(3)の等価応力 σ_e は両辺を二乗して σ_e^2 で割ると楕円の式となる。 σ_e に降伏点 σ_y を当てて楕円の第1象限を示すと図4の通りとなる。図は等価応力の締付け時の最大値を降伏点の90%とした点Bで示している。このときねじ軸部ねじりトルク T_s は最大となる。トルクレンチを取外すと軸部ねじりトルクは少し開放されC点に移動し T_s' となり、最大値の70%程度とされている。C点では外力の許容余裕は降伏点の12%程度とされている。

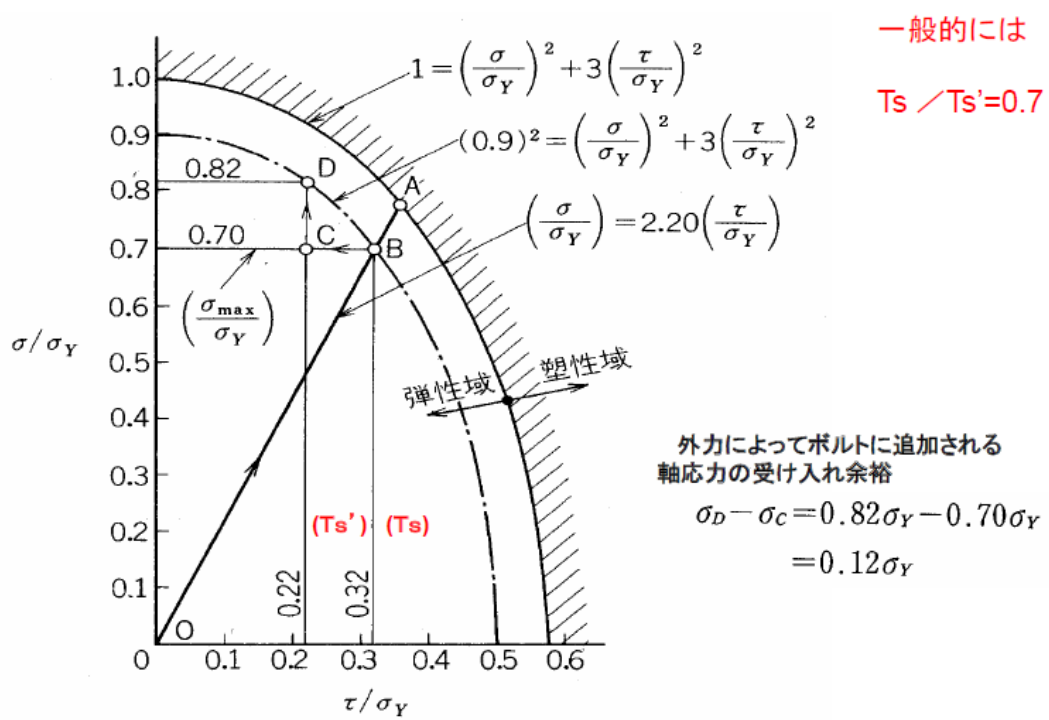


図4 締付け応力の最大値 (σ_{max}) を求める図

3 ねじ締付け特性値の測定⁽¹⁻⁴⁾

ねじ締付け特性値の測定は図 5 に示す実験装置を用いた。作業者はトルクレンチを用いてねじ締付け特性値検出器にセットしたボルトを目標締付けトルクで締付ける。作業者が締付けた実締付けトルクを検出するためトルクレンチとボルトの間にトルクセンサーを挿入した。センサーで測定したトルクはトルクメータで締付けトルクに変換しパソコンにデータ収録する。各種のねじ締付け特性値はねじ締付け特性値検出器に貼った直角 3 軸型ひずみゲージにより測定し、リアルタイムでパソコンに Excel ファイルとしてデータ収集した。

図 6 はボルト軸部および検出器に貼ったひずみゲージによるねじ締付け特性値の比較結果を示す。検出器ではボルトでの締付けからゆるめまでの過程およびねじ締付け特性値を正確に捉えていることを示している。図 7 は各種のねじ締付け特性値の測定結果を図示したもので、締付け初期から締付け完了そしてゆるめ側の過程も示している。

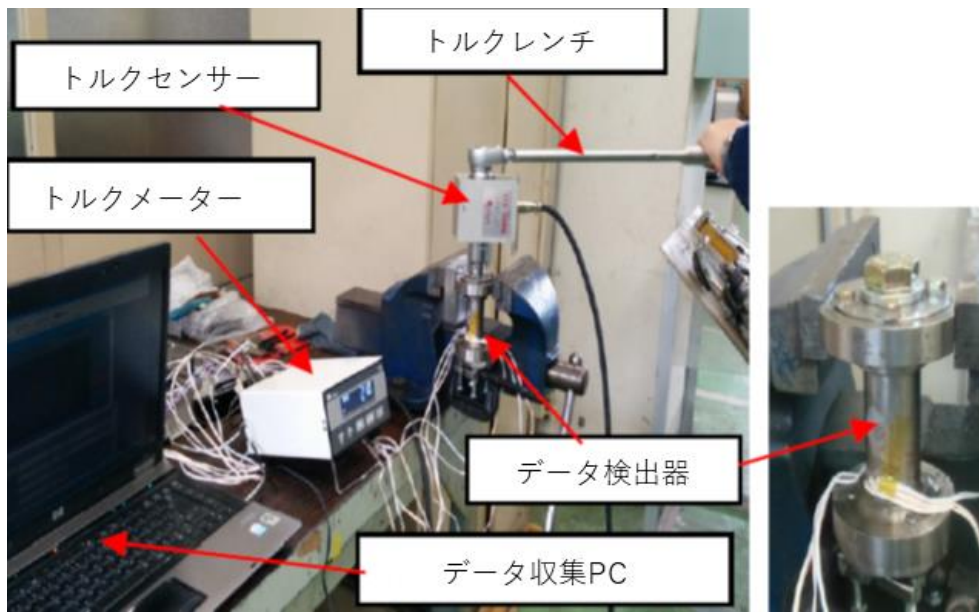


図5 ねじ締付け特性値検出器

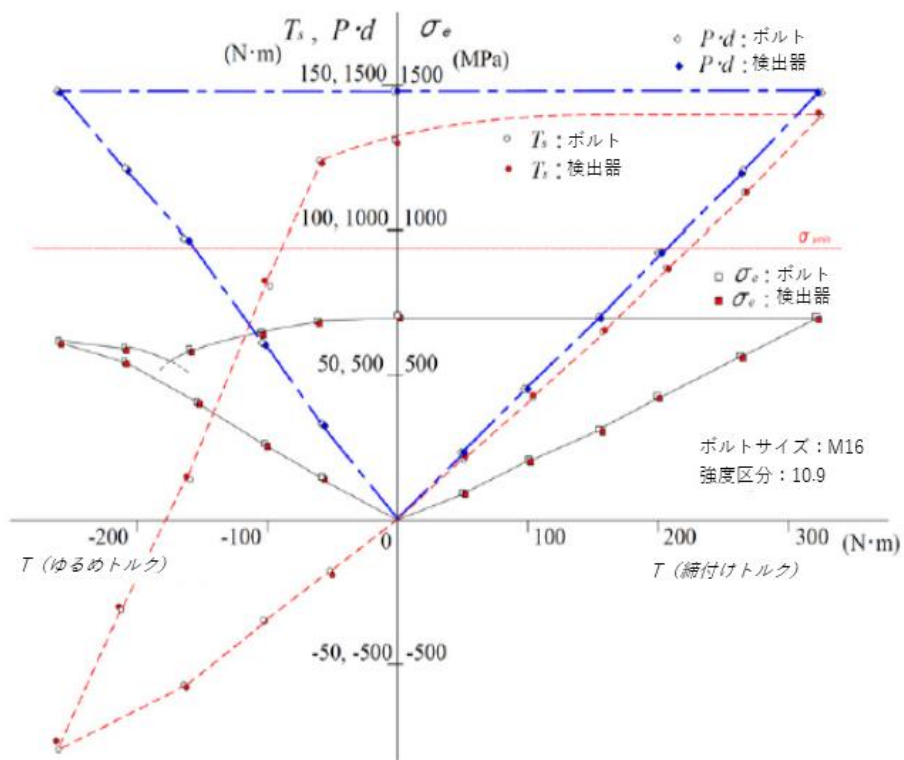


図6 ボルト軸部および検出器に貼ったひずみゲージによるねじ締付け特性値の比較

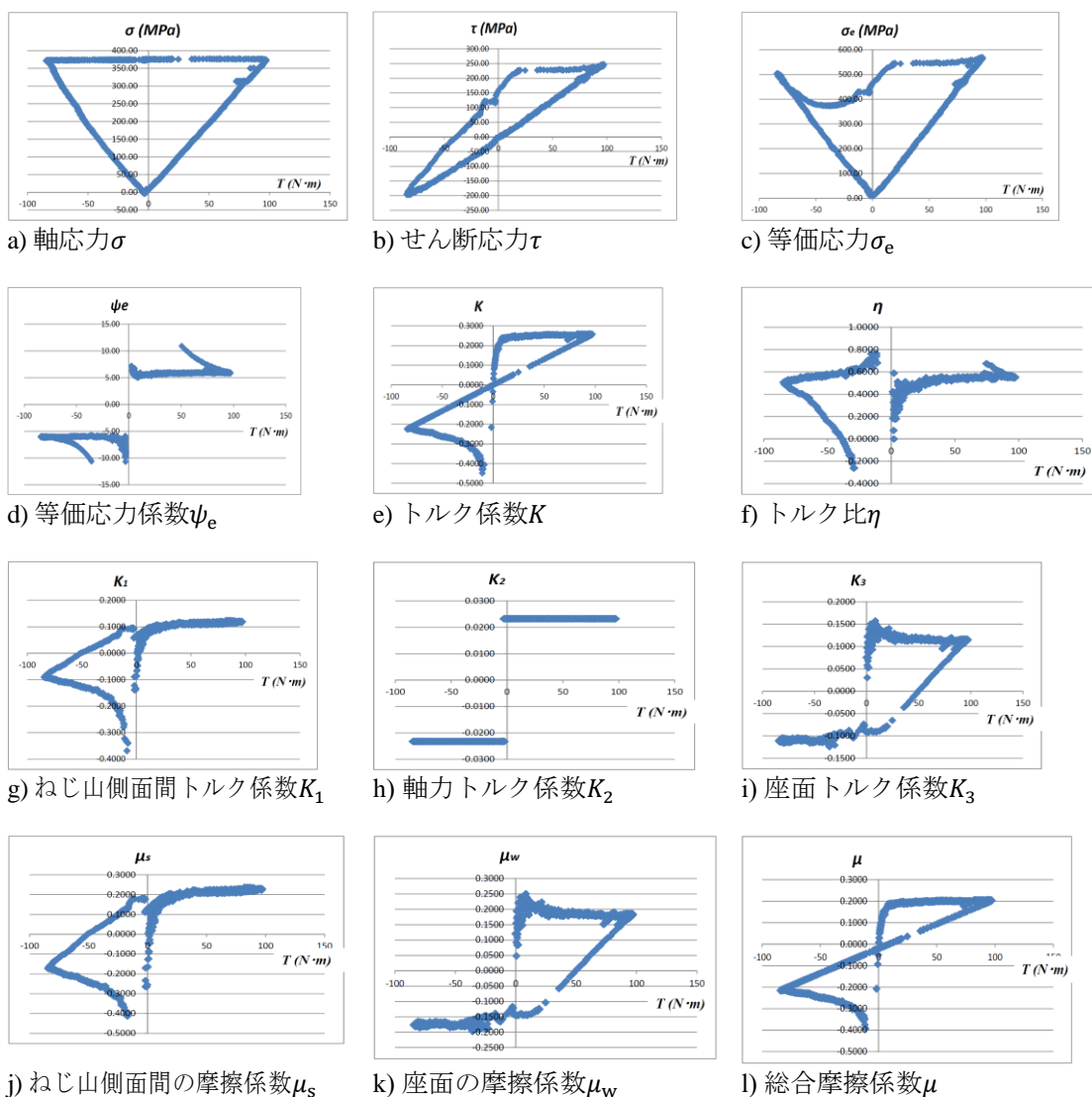


図7 検出器による各種ねじ締付け特性値の測定結果

3 ねじ締付け特性値の分析⁽¹⁻³⁾

ねじ締付け特性値の分析は、表1に示す $L_8(2^7)$ 線点図を用い実験計画法⁽⁷⁾による割付けで行った。よく知られているように、実験計画法は実験結果の分析をより少ない実験回数で効率よく求める方法として定着している。本実験では実験条件を表に示す通り、潤滑条件、トルクレンチの種類、ボルトの強度区分およびねじサイズとした。表2は実験条件の詳細を示すもので、ボルトの強度区分および潤滑条件ごとの目標締付けトルクを示している。同一条件の実験の繰返し数は3で行った。

表1 実験計画法による実験条件の割付けと線点図

	1	2	3	4	5	6	7
1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	2	2	2	2
3	1	2	2	1	1	2	2
4	1	2	2	2	2	1	1
5	2	1	2	1	2	1	2
6	2	1	2	2	1	2	1
7	2	2	1	1	2	2	1
8	2	2	1	2	1	1	2
因子	a	b	ab	c	ac	e	d

潤滑	レンチ	相互作用	強度区分	相互作用	誤差	ボルトサイズ
1: なし	1: プリセットタイプ		1: 8.8			1: M12
2: Loctite 263	2: ダイアルタイプ		2: 10.9			2: M16

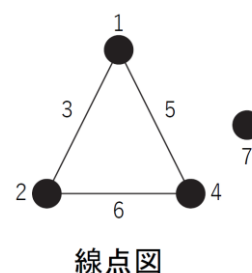


表2 実験条件の詳細

ボルト詳細	M12 (有色クロメート処理)				M16 (有色クロメート処理)			
	8.8		10.9		8.8		10.9	
強度区分	なし		あり		なし		あり	
潤滑	なし	あり	なし	あり	なし	あり	なし	あり
締付けトルク [N·m]	85.1	68.9	124.6	101.2	213.7	172.2	313.8	252.0
理論目標トルク								
作業者表示トルク	86	68	124	102	214	172	314	252
締付け工具 (レンチ) プリセット形レンチ 旭金属工具 (株)	LQK 280N (40-280 N·m)				LQK 420N (60-420 N·m)			
締付け工具 (レンチ) ダイアル形レンチ 京都機械工具 (株)	CMD 143 (30-140 N·m)				CMD 484 (100-480 N·m)			

潤滑なし：潤滑剤を使用せず

潤滑あり：ねじフランク面にLoctite 263を使用

図8は実験結果から等価応力係数 ψ_e の正規分布性の評価したものである。歪度(Skewness)および尖度(Kurtosis)で正規分布性を評価した。正規性は不十分な結果となっている。図9はトルク係数 K の正規分布性を同様に評価した結果である。やはり正規性は不十分な結果となっている。これは実験作業を手作業で行ったためヒューマンエラーの影響が出たこと、実験回数が3と少なかったことなどによるものと考えられる。

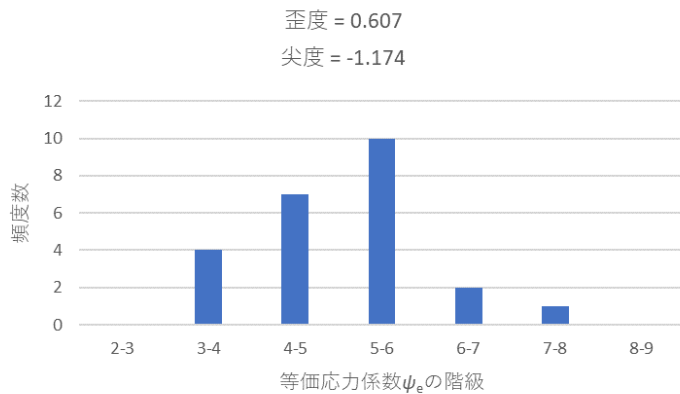


図8 等価応力係数 ψ_e の正規分布性の評価

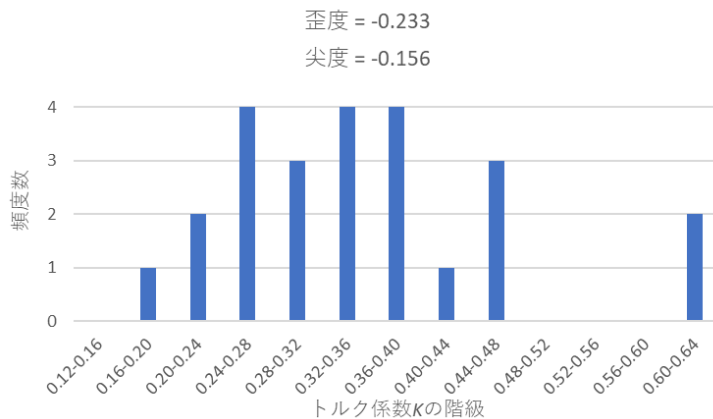


図9 トルク係数 K の正規分布性の評価

表3は等価応力係数 ψ_e の各実験条件での測定値と分散分析結果を示す。各種ねじ締付け特性値についても同様の分散分析を行った。それらの結果から各種ねじ締付け特性値の分析結果から95%および99%の信頼限界値としてまとめたのが表4である。なお、軸力係数 k は式(1)を $P = T/(Kd) = kT$ と置いたときの係数であり、 $k = 1/(Kd)$ となる。

表5は、これらの分析結果から締付け過程における締付けトルク、ゆるめトルク、軸応力、せん断応力および等価応力の信頼区間を95%および99%の信頼区間で分析した結果を示している。これらの実験結果から、前報の図13に示した締付け係数 Q ($Q = \text{軸力分布の最大値/最小値}$)は $Q = 2.9$ および締付け作業係数 a ($a = (T_{\max} - T_{\min}) / (2T_{\text{mean}})$)は $a = 1.212$ であった。

特に締付け係数 Q は大きく初期軸力のばらつきが大きいことを示しているが、これは潤滑条件、強度区分およびねじサイズなどで分けずすべての条件で分析したためである。

表3 等価応力係数 ψ_e の各実験条件での測定値と分散分析結果

a) データ (ψ_e)

	締付け作業者		
	A	B	C
1	7.179	5.614	6.816
2	5.552	4.605	5.296
3	4.864	4.672	4.769
4	4.575	3.947	3.589
5	5.704	5.686	5.195
6	3.300	3.444	5.612
7	4.903	6.379	5.846
8	4.636	5.156	4.437

b) 母平均の推定

因子	水準	平均	信頼限界		信頼限界	
			99% 最小	99% 最大	95% 最小	95% 最大
A: 潤滑	1: なし	5.1232	4.5241	5.7223	4.6899	5.5565
	2: Loctite 263	5.0248	4.4257	5.6239	4.5914	5.4581
B: トルクレンチタイプ	1: プリセット形	5.3336	4.7345	5.9327	4.9002	5.7669
	2: ダイアル形	4.8144	4.2153	5.4135	4.3811	5.2477
C: 強度区分	1: 8.8	5.6356	5.0365	6.2347	5.2022	6.0689
	2: 10.9	4.5124	3.9133	5.1115	4.0791	4.9457
D: ねじサイズ	1: M12	5.1004	4.5013	5.6995	4.6670	5.5337
	2: M16	5.0476	4.4485	5.6467	4.6143	5.4809

c) 分散分析表

因子	平方和	自由度	不偏分散	分散比	P値	寄与率	判定
ブロック(*R)	0.2669	2	0.1335	0.2691	0.7677	0.0000	
A	0.0581	1	0.0581	0.1172	0.7369	0.0000	
B	1.6172	1	1.6172	3.2604	0.0911	5.0753	
C	7.5694	1	7.5694	15.2607	0.0014	32.0191	**
D	0.0167	1	0.0167	0.0337	0.8568	0.0000	
AB	5.0976	1	5.0976	10.2773	0.0059	20.8300	**
AC	0.0251	1	0.0251	0.0507	0.8250	0.0000	
誤差	7.4401	15	0.4960			42.0756	
不適合	0.4518	1	0.4518	0.9052	0.3575		
純誤差	6.9882	14	0.4992				
計	22.0911	23				100	

表4 各種ねじ締付け特性値の分析結果

特性	等価応力係数	軸力係数	トルク係数 (ナットファクター) K	トルク比 η	ねじ山側面間の摩擦係数 μ_s	座面の摩擦係数 μ_w	総合摩擦係数 μ ($\mu_s = \mu_w$)
統計値	ψ_e	k					
平均	5.096	3.156	0.350	0.504	0.276	0.289	0.283
95%信頼限界最大	7.035	4.996	0.562	0.661	0.419	0.535	0.467
95%信頼限界最小	3.156	1.316	0.139	0.347	0.132	0.043	0.099
99%信頼限界最大	7.649	5.578	0.628	0.711	0.465	0.613	0.526
99%信頼限界最小	2.543	0.734	0.072	0.297	0.087	-0.035	0.041

表5 締付けトルクと各種応力の分析結果

特性	T_R	T_N	D_L	D_s	D_T	D_e
統計値						
平均	1.080	1.000	0.894	1.020	0.701	0.844
95%信頼限界最大	1.227	1.122	1.037	1.080	1.049	0.998
95%信頼限界最小	0.934	0.878	0.752	0.960	0.354	0.689
99%信頼限界最大	1.273	1.161	1.082	1.114	1.158	1.046
99%信頼限界最小	0.888	0.839	0.707	0.926	0.244	0.641

なお、表中の記号の意味は下記の通りである。

T_R ：締付けトルクの超過率

T_N ：正規化した締付けトルク

D_L ：締付けトルクに対するゆるめトルク率

D_s ：軸応力の最大値に対する低下率

D_T ：せん断応力の最大値に対する低下率

D_e ：等価応力の最大値に対する低下率

これらの分析結果から、ゆるめトルク率の平均値は理論値より大きめの 0.894 であった。せん断応力の最大値に対する低下率は山本の指摘にある値に近い 0.701 であった。

4 まとめ

各種ねじ締付け特性値を求めるためのねじ締付け試験は、通常試験本数が多くなる。そのような実験を効率的に行う方法として実験計画法が開発されている。本技術寄稿では、トルク法におけるねじ締付け特性値の測定方法を示すとともに、実験計画法を用いた実験結果の分析方法を解説した。本稿がねじ適正締付けに取り組む技術者のご参考になるのであれば幸いである。

参 考 文 献

- (1) Hareyama, S., Manabe, K., Shimodaira, T., Naganawa, T., 2016, Experimental Study to Verify Elliptical Confidence Limit Method for Bolted Joint Tightening, Proceedings of ASME, IMECE2016-66336, 9 pages.
- (2) 晴山、トルク法によるねじ締め付けにおける軸力管理に関する研究（第1報、ねじ軸力分布の信頼限界について）、機論 53-508C(昭 63-12), 3048.
- (3) 晴山、トルク法によるねじ締め付けにおける軸力管理に関する研究（第2報、信頼限界だ円による初期軸力の向上について）、機論 54-495C(昭 62-11), 2373.

- (4) 晴山、技術寄稿「ねじ締結の原理と締結信頼性の向上」(その①：トルク法の力学)，ハードロック工業(株)技術ナビ，2022年7月.
- (5) 池田ら、ボルトの締付けについて、機論 36-290(昭 45), 1735.
- (6) 山本、ねじのおはなし、日本規格協会(1992)、p. 67.
- (7) 菅、Excel で学ぶ実験計画法、オーム社(平成 21 年)

■寄稿者紹介

氏名 晴山 蒼一（はれやま そういち）

略歴 昭和44年4月 東洋運搬機株式会社（現：三菱ロジスネクスト）入社

昭和44年5月 同上 技術研究所第2研究室 配属

- ・ 構造物の強度評価システムの確立

- ・ ねじの適正締付けとゆるみ及び強度評価に関する研究に従事

平成元年1月 同上 技術研究所第1研究室室長

- ・ コンテナヤード管理システムの開発に従事

平成7年9月 同上 港湾CHS事業部 副事業部長

平成18年4月 同上 技術開発センター長

平成20年4月 同上 技師長、首都大学東京 非常勤講師

平成22年4月 日立建機（株）技術開発センター テクニカルアドバイザー

平成24年4月 首都大学東京 客員教授、蒼テクノロジー設立

令和3年4月 東京都立大学 客員研究員

⇒ 現在に至る