ねじ部品の疲労試験方法標準化について*

大橋 宣俊*¹, 萩原 正弥*², 吉本 勇*³On the Standardization of Fatigue Testing Method
for Threaded Fasteners

Nobutoshi OHASHI, Masaya HAGIWARA, and Isamu YOSHIMOTO

The standardization of a fatigue testing method is very important for collecting fatigue strength data for threaded fasteners. The Japanese Industrial Standard on this testing method was published by taking account of the ISO Standard and the JSME Standard. In the procedure of drafting the above JIS, the experimental research and statistical discussions were conducted and the main conclusions are as follows: (1) Three companies in the first-step experiment and six companies in the second-step experiment performed the fatigue tests, and no confusion resulted in the application of the 14S-N testing method according to the JSME Standard. (2) Based on the 14 S-N testing method, the experiments of the one-way classification model and the two-way classification model were performed, and the method of analysis of variance for such experimental results is shown.

Key Words: Machine Element, Fastener, Threaded Fastener, Bolt, Fatigue, Fatigue Strength, Fatigue Test, Standardization

1. 緒 言

ねじ締結体の強度設計において、ねじ部品の疲労強度は重要な因子の一つである。この疲労強度に関するデータを蓄積する上で、疲労試験方法の標準化は重要な意義をもつ。

ISO(国際標準化機構)/TC 2(締結用部品)は、長年の審議を経て、1977年にねじ部品の疲労試験方法に関するISO規格⁽¹⁾を制定した。この規格には、統計的方法の適用という項目が含まれているが、その詳細は第2部で規定することになっている。

わが国では、第2部が制定された時点でJISに導入する予定であったが、第2部の発行は遅れていた。一方、1981年に日本機械学会(JSME)が「統計的疲労試験方法」という学会基準⁽²⁾を制定した。これを参考にしてISO規格の第2部に相当する部分を補充して、1986年「ねじ部品の引張疲れ試験方法」というJIS⁽³⁾が制定された。

日本ねじ研究協会は、昭和57～59年度に、工業技術

院からの委託を受けて、「塑性域ねじ締結に関する標準化のための調査研究」を実施した⁽⁴⁾。その一部として、上述のJSME基準をJISに取り入れるための実験的研究を行った。ここでは、同研究協会の許可を得てこの実験的研究と、その後著者らが行った考察を報告する。

2. ISO規格およびJISの概要

文献(1)のISO規格と文献(3)のJISの規定項目を対照させて表1に示す。JISB 1081の本体(附属書を除いた部分)の内容はISO 3800/1の内容と整合している。JISの適用範囲は次のとおりである。「この規格は、繰返し数 1×10^4 回以上の疲れ寿命を対象として、室温、大気中における解放結合状態の締結用ねじ部品に軸方向の引張荷重を加えて行う引張疲れ試験方法について規定する。」

両規格とも統計的方法の適用という項目を含むが、緒言で述べたように、ISO規格では統計的方法の詳細は第2部で規定することとしている。一方、JISでは、表1に示すように附属書に統計的方法を規定している。ここでは、JIS附属書の内容を述べる。

JIS附属書の内容は、文献(2)のJSME基準に規定されている14 S-N試験法に基づいている。その概要

* 平成元年7月14日 東海支部岐阜地方講演会において講演、原稿受付 昭和63年11月22日。

*¹ 正員、相模工業大学 (〒251 藤沢市辻堂西海岸1-1-25)。

*² 正員、名古屋工業大学 (〒466 名古屋市昭和区御器町)。

*³ 正員、拓殖大学工学部 (〒193 八王子市館町815-1)。

は次のとおりである。少なくとも14個の試験片を準備し、 $S-N$ 曲線の傾斜部を決定するために、4段階の応力振幅で各2個ずつ計8個の試験片、水平部を決定するために6個の試験片を用いる。水平部の決定には少数の試験片によるステアケース法⁽⁵⁾を適用する。また傾斜部に対する8個の試験片のデータは、ほぼ $N=5 \times 10^4$ と $N=1 \times 10^6$ の間に収まるようにする。

ステアケース法における1個めの試験応力振幅および応力振幅階差は傾斜部のデータを用いて決定する。傾斜部のデータに対して回帰分析を行い、それによって傾斜部の回帰直線 ($\log N = \alpha + \beta \sigma_a$, σ_a は応力振幅) を求めるとともに、時間強度の標準偏差 $S(\sigma_a)$ の推定値を求める。傾斜部に対する試験において、特定の N の値(一般には 1×10^7 , ねじ部品の場合には 5×10^6) に達するまで未破壊のデータが少なくとも1個含まれるようにする。この未破壊のデータのうちの1つをステアケース法における1個めのデータとし、上述の $S(\sigma_a)$ の推定値に近い値(適宜丸めた値を用いる)を応力振幅階差とする。これらのことを次章で例について詳しく述べる。なお、ねじ部品の場合の軸方向応力は、軸方向荷重をねじの有効断面積で割って求める。

3. 第1段階の実験

第1段階の実験として、表2のような計画を立てた。この計画は、昭和58年度に塑性域ねじ締結の標準化に関して実施した実験⁽⁴⁾の一部である。実験場所は6箇所のねじ部品製造会社、疲労試験の条件は最大応力を一定(規格に規定された最小耐力の90%)としている。

図1に試験片の形状および寸法を、表3に引張試験

表1 ISO 3800/1 と JIS B 1081 の比較

Contents of ISO 3800/1	Contents of JIS B 1081
1. Scope and field of application	1. Field of application
2. References	2. Definitions of terms and symbols
3. Principle	3. Test pieces
4. Definitions and symbols	4. Apparatus
5. Apparatus	5. Test method
6. Test procedure	6. Application of statistical methods
7. Test plans	7. Report of test results
8. Application of statistical methods	Appendix Derivation of S-N curve and P-S-N curve according to statistical methods
9. Test report	

表2 第1段階の実験計画

Items	Places*					
	F	G	J	N	S	T
Tensile test (Machined test piece and full-size bolt)	○				○	○
Fatigue test**		○	○	○		

Note) * F: Fuserashi, G: Goshō Seisakusho, J: Jidosha Buhin Kogyo, N: Nagoya Rashi, S: Saga Tekko, T: Topura

** $\sigma_{max} = 0.9R_{p0.2}$, $R_{p0.2}$: Minimum proof stress in standard

の結果を示す。ねじのサイズは M10 (メートル並目)、部品等級は A とした。ただしめねじの内径に対する公差は等級 A に対しては $6H$ であるが、ここでは $5H$ とした。強度区分はボルトに対し 8.8, ナットに対して 8 である。規格⁽⁶⁾における規定によれば、ボルトの最小引張強さ $R_m = 800$ MPa, 最小耐力 $R_{p0.2} = 640$ MPa である。表3における引張試験は、F, S, T の各社で平滑試験片およびボルト試験片各3個ずつを試験した結果の平均値で、表中の「平均」は全体の平均値である。

図2に疲労試験のセット状態、図3に14 $S-N$ 試験法による疲労試験結果の $S-N$ 線図およびステアケース法による試験経過、表4に同結果の主な数値を示す。例えば図3(a)は実験場所 G の結果で、●印は破壊した試験片に対するデータ、○印は $N=5 \times 10^6$ で未破壊の試験片に対するデータを示す。各データの傍に付してある番号は試験の順序を示す。この場合には No.2~10 (ただし No.6 を除く) のデータ (計8個) に対し回帰分析を行い、 $\log N = 7.23 - 0.337 W_a$ (表4参照) という回帰直線と、この部分の時間強度に対する標準偏差 $S(W_a) = 0.742$ kN という結果を得ている。

ステアケース法による試験手順を、この具体例 [図3(a)] について説明すれば、次のとおりである。ここでは繰返し数 N が 5×10^6 に達して未破壊の場合には疲労試験を打切っているため、 $N=5 \times 10^6$ における疲労強度 σ_N (応力振幅で表す) または W_N (荷重振幅で表す) の推定を対象とする。またステアケース法に用いる試験片の数は6個である。

表3 ボルトの引張試験結果(1)

Places*	Machined test piece		Full-size bolt
	Proof stress $\sigma_{0.2}$	Tensile strength σ_B	Tensile strength σ_B
F	865	948	905
S	859	948	914
T	859	941	905
Mean	861	946	908

Note) * See footnote of Table 2

	Product grade	Strength grade	Manufacturing process for screw threads	Material
Bolt	A	8.8	Heat treatment after thread rolling	S43C
Nut	A (5H for minor diameter)	8	Tapping after heat treatment	S43C

図1 試験片の形状および寸法

表 4 疲労試験結果(1)

Places	Inclined part of S-N curve			Fatigue limit by Staircase method		
	Regression line $\log N = a - b \log W_a$		Standard deviation of fatigue strength $S(W_a)$ (kN)	Step of load amplitude d (kN)	Fatigue limit	
	a	b (1/kN)			W_N (kN)	σ_N (MPa)
G	7.23	0.337	0.742	0.980	3.43	59.1
J	6.80	0.265	0.329	0.245	3.88	66.9
N	6.68	0.235	0.502	0.490	3.84	66.2
Mean			0.551		3.72	64.1
*	6.94	0.276	0.588			

Note) * the values obtained from the 8 x 3 failure data in the inclined parts of 3 S-N curves

図 2 疲労試験のセット状態

ステアケース法における1個めの試験荷重振幅 $W_a(1)$ として、傾斜部の試験において破壊データが1個も生じていない荷重振幅をとり、これに相当するデータ(この例では No.6)をステアケース法における1個めのデータとする。ステアケース法における荷重振幅階差 d としては $S(W_a)$ に近い値[この例では 0.98 kN(100 kgf)]を用いている。

1個めのデータ(No.6)が未破壊であるから、2個めの試験片(No.11)については、 $W_a(2) = W_a(1) + d$ で試験を行う。2個めのデータも未破壊であるから、3個め(No.12)の荷重振幅は $W_a(3) = W_a(2) + d$ である。3個めのデータは破壊であるから、4個め(No.13)の荷重振幅は $W_a(4) = W_a(3) - d$ である。以下同様にして6個めの試験片(No.15)まで試験を実施する。

$N = 5 \times 10^6$ における疲労強度(以下疲労限度と呼ぶ) W_N の推定値 $\hat{W}_N$ は次式で求められる。

$$\hat{W}_N = \{W_a(2) + W_a(3) + \dots + W_a(7)\} / 6 \quad \dots (1)$$

$W_a(7)$ は7個めの荷重振幅で、試験は実施しないが、6個めのデータにより図に示すように決定される。式(1)により求められた W_N の推定値およびその値をねじの有効断面積 A_s で割って応力で表した疲労限度 σ_N の推定値を表4に示す。

図 3 14S-N 試験法による疲労試験結果(1)

4. 第2段階の実験

第2段階の実験計画を表5に示す。この計画は昭和59年度に塑性域ねじ締結の標準化に関して実施した実験⁽⁴⁾の一部である。この段階では、引張試験も疲労

試験も6社全部で実施した。疲労試験の条件としては、ISO規格⁽¹⁾の規定を参考にして、最小応力と最大応力の比 $R_s=0.1$ 、平均応力 $\sigma_m=0.5R_{p0.2}$ ($R_{p0.2}$ は規格の最小耐力) および $\sigma_m=0.9R_{p0.2}$ の3条件を選んだ。試験片の形状および寸法などは第1段階の場合と同じで、図1に示すとおりであるが、第2段階用として改めて製作した。

引張試験の結果を表6に示す。この場合にも、各社で平滑試験片およびボルト試験片各3個ずつ試験した結果の平均値、および全体の平均値を示す。引張強さも耐力も第1段階の場合の値(表3参照)より低いが、強度区分8.8の規定は十分満足している。

疲労試験の結果を表7に示す。表中の記号および数値の意味は第1段階の実験の場合に説明したとおりである。ただし、表7の場合には、疲労試験の条件を3通りに変え、各条件について2箇所(1社は第1段階で疲労試験、他の1社は第1段階で引張試験を実施)ずつで疲労試験を行っている。

表7に示す疲労限度 σ_N を Haigh 線図(横軸に平均応力 σ_m 、縦軸に応力振幅 σ_a をとって疲労限度をプロットする)の形式で表すと図4が得られる。3条件に対し、各2個の疲労限度データ(○印)がプロットされているが、それら2個の平均値を結んだ直線を破壊確率 $P_r=50\%$ の疲労限度線とする。ステアケース法における仮定に従って疲労限度の分布を正規分布と考え⁽⁵⁾、 $P_r=10\%$ および 90% の疲労限度線を図中に示す。少数試験片によるステアケース法における仮定⁽⁵⁾に従って、疲労限度の標準偏差が S-N 曲線傾斜部における時間強度の標準偏差 $S(\sigma_a)$ に等しいと考え、表7に

おける $S(W_a)$ の二乗平均の平方根をねじの有効断面積で割ったものを $S(\sigma_a)$ として用いた。

なお、図4において○印のデータは第2段階の実験の結果、×印のデータは第1段階の実験の結果である。

5. 考 察

第1段階の実験では、14 S-N 試験法を用い、同じロットの試験片を同じ条件で、異なる場所で疲労試験を行っている。実験場所が違うと、試験機も試験担当者も異なるわけである。図3の結果を見ると、もしステアケース法による試験を行わずに疲労限度線を目のこで引いたとすれば、求められた疲労限度にはかなりのばらつきを生ずると思われる。6個の試験片を用いたステアケース法により求められた疲労限度は表4に示すとおり、そのばらつきは比較的小さい。

実験場所により実験結果が異なるかどうかを判定するには、統計的手法として分散分析を用いるのが普通である。表3に示す引張試験の場合には、1個の試験片により1個の引張強さのデータが得られる。この場合の実験データのモデルを表8(a)に示す。このデータに対する分散分析は次のように行われる⁽⁷⁾。まず因子Aに対するMSA、誤差Eに対するMSEを次式で計算する。

$$MSA = \frac{r}{p-1} \sum_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2, \text{ d.f.} = p-1 \quad \dots\dots\dots (2)$$

表5 第2段階の実験計画

Items	Places*	F	G	J	N	S	T
Tensile test (Machined test piece and full-size bolt)		○	○	○	○	○	○
Fatigue test**	$R_s=0.1$	○		○			
	$\sigma_m=0.5R_{p0.2}$		○				○
	$\sigma_m=0.9R_{p0.2}$				○	○	

Note) * See footnote of Table 2

** $R_s = \sigma_{min} / \sigma_{max}$, $R_{p0.2}$: Minimum proof stress in standard

表6 引張試験結果(2)

Places	Machined test piece		Full-size bolt
	Proof stress $\sigma_{0.2}$	Tensile strength σ_u	Tensile strength σ_u
F	813	908	879
G	823	911	882
J	816	918	887
N	833	924	889
S	823	921	892
T	820	911	865
Mean	821	915	881

表7 疲労試験結果(2)

Test conditions	Places	Inclined part of S-N curve			Fatigue limit by Staircase method		
		Regression line $\log N = a - b \log W_a$		Standard deviation of fatigue strength	Step of load amplitude	Fatigue limit	
		a	b (1/kN)			W_N (kN)	σ_N (MPa)
$R_m=0.1$	J	7.25	0.255	0.343	0.245	5.02	86.6
	F	7.43	0.306	0.343	0.490	4.00	69.0
$\sigma_m=0.5R_{p0.2}$	G	6.26	0.194	0.686	0.784	3.68	63.4
	T	6.61	0.235	0.461	0.490	4.26	73.4
$\sigma_m=0.9R_{p0.2}$	N	7.21	0.327	0.235	0.245	3.64	62.8
	S	6.62	0.245	0.392	0.392	3.40	58.6

$$MSE = \frac{1}{p} \sum_i S_i^2, \text{ d.f.} = p(r-1) \dots\dots\dots (3)$$

因子 A に有意差がなければ, MSA/MSE が, 自由度 $[p-1, p(r-1)]$ の F 分布に従うことを利用して検定を行う。

表4に示す疲労試験の場合には, 各実験場所で14~16個の試験片を用い, 疲労限度として各1個のデータが得られる。このデータは式(1)により計算されたもので, 文献(5)の研究によれば, ほぼ $(n_2/2)$ 個のデータ (n_2 はステアケース法に用いる試験片の個数で, 式(1)の場合には $n_2=6$) の平均値に相当する。また, このデータ W_N には $S-N$ 曲線の傾斜部における時間強度の標準偏差 $S(W_a)$ が付随する。 $S(W_a)$ の自由度は (n_1-2) (n_1 は傾斜部の回帰分析に用いるデータの個数で, 14 $S-N$ 試験法では $n_1=8$) である。

したがってこの場合の実験データのモデルは表8(b)に示すとおりである。すなわち, $\bar{X}_i$ は A_i における $(n_2/2)$ 個の標本平均値, S_i は A_i における標本標準偏差 [自由度 (n_1-2)] である。表8(a)では $\bar{X}_i$ は

表8 実験データのモデル

(a)	A_1	$X_{11}, X_{12}, \dots, X_{1r}$	$\bar{X}_1, S_1$	$\bar{X}_i = \frac{1}{r} \sum_j X_{ij}$
	A_2	$X_{21}, X_{22}, \dots, X_{2r}$	$\bar{X}_2, S_2$	
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$S_i^2 = \frac{1}{r-1} \sum_j (X_{ij} - \bar{X}_i)^2$
	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	
	A_p	$X_{p1}, X_{p2}, \dots, X_{pr}$	$\bar{X}_p, S_p$	$\bar{X} = \frac{1}{p} \sum_i \bar{X}_i$
(b)	A_1	$\bar{X}_1, S_1$	$\bar{X}_i$: the mean of $\frac{n_2}{2}$ data	
	A_2	$\bar{X}_2, S_2$	Degree of freedom for S_i : $(n_1 - 2)$	
	$\vdots$	$\vdots$		
	$\vdots$	$\vdots$		
	$\vdots$	$\vdots$		
	A_p	$\bar{X}_p, S_p$

図4 疲労試験結果(2)による Haigh 線図

r 個の標本平均値, S_i の自由度は $(r-1)$ であったことを考慮に入れば, 表8(b)に対する分散分析は次のように行われる。まず MSA, MSE を次式で計算する。

$$MSA = \frac{n_2}{2(p-1)} \sum_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2, \text{ d.f.} = p-1 \dots\dots\dots (4)$$

$$MSE = \frac{1}{p} \sum_i S_i^2, \text{ d.f.} = p(n_1-2) \dots\dots\dots (5)$$

因子 A に有意差がなければ, MSA/MSE が, 自由度 $[p-1, p(n_1-2)]$ の F 分布に従うことを利用して検定を行う。

このようにして表4の結果(疲労限度 W_N) に対して行った分散分析の結果を表9に示す。有意水準5%で「実験場所により疲労限度の値は変化しない」ということができる。

表7の実験結果は, 次のように2元配置の実験と考える。因子 A は試験条件で3水準, 因子 B は実験場所で2水準とする。 A_1 は $R_s=0.1$, A_2 は $\sigma_m=0.5R_{p0.2}$, A_3 は $\sigma_m=0.9R_{p0.2}$; B_1 は(J, G, N), B_2 は(F, T, S)。第1段階の実験で B_1 は疲労試験, B_2 は引張試験を行ったグループである。分散分析の手順は上述の1元配置の場合を参考にすれば容易に類推できる。その結果を表10に示す。有意水準を1%とすれば A のみが有意, 5%とすれば, A および $A \times B$ が有意という判定が得られた。

なお, 以上の疲労試験は文献(2)に規定されている14 $S-N$ 試験法の手順どおりに各実験場所で行って実施してもらったが, 実施上の混乱は全くなかった。

6. 結 言

本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

表9 表4の結果に対する分散分析

Factor	Degree of freedom	SS	MS	MS ratio	Decision
A	2	0.372	0.186	0.61	Not significant
Error(E)	18	—	0.304	—	—

表10 表7の結果に対する分散分析

Factor	Degree of freedom	SS	MS	MS ratio	Decision
A	2	2.95	1.475	7.86	**
B	1	0.218	0.218	1.16	
A × B	2	1.93	0.965	5.13	*
Error(E)	36	—	0.188	—	

Note) * Significant at 5% level

** Significant at 1% level

(1) ねじ部品の疲労試験方法を標準化するに際し、JSME 基準の 14S-N 試験法の導入を考え、そのための実験的研究および統計的検討を行った。

(2) 第 1 段階の実験では 3 社、第 2 段階の実験では 6 社が疲労試験を実施したが、14S-N 試験法の手順どおりで実施上の混乱は全くなかった。

(3) 14S-N 試験法を基にして、1 元配置および 2 元配置の実験を実施し、これに対する分散分析の方法を示した。

この研究を進めるに当たり、日本ねじ研究協会・塑性域ねじ締結調査研究委員会(委員長：北郷薫教授)および日本機械学会統計的疲労試験方法基準改訂分科会(主査：中沢一教授)の構成員の方々からいただいたご

教示とご援助に対し感謝の意を表す。

文 献

- (1) ISO 3800/1 Threaded fasteners-Axial load fatigue testing-Part 1: Testing methods, (1977).
- (2) 日本機械学会基準 JSME S 002 統計的疲労試験方法, (1981).
- (3) JIS B 1081 ねじ部品の引張疲れ試験方法, (1986).
- (4) 日本ねじ研究協会編, 塑性域ねじ締結に関する標準化のための調査研究報告書, 第 I 報, (1983), 第 II 報, (1984), 第 III 報, (1985).
- (5) 吉本, 機論, 26-167(1960), 918: 27-179 (1961), 1057.
- (6) ISO 898-1 Mechanical properties of fasteners-Part 1: Bolts, screws and studs, (1988).
- (7) 例えば, 吉本, 工業統計解析, (1981)99, 養賢堂.