Prediction of Fatigue Life of Rolled Bolt-Nut Joints under Four-Step loading and Four-Level Multi-Step Loading

○学 山下 友実子 (長崎大院)

正 瀬戸口 克哉 (長崎大)

正 高瀬 徹 (長崎大)

Yumiko YAMASITA, Nagasaki University, 1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki

Katsuya SETOGUCHI, Nagasaki University

Toru TAKASE, Nagasaki University

Key words: Fatigue, Life Prediction, Bolt-Nut joint, Four-Step Loading, Four-Level Multi-Step Loading

1. 結 言

これまでの筆者等の研究によれば, S25C 焼なまし平滑材に対して検討した二段二重疲労寿命推定法⁽¹⁾は本研究に用いた転造ねじ継手へも適用可能であり⁽²⁾, さらに, 等価応力振幅を用いることによって, 一次応力振幅の影響が少なくなることを示した⁽³⁾. この二段二重疲労寿命推定法と既報⁽²⁾の損傷則をもとにした多段多重疲労寿命推定法を検討し, 三段三重および三段多重疲労試験を行った結果, 試験結果と推定結果との間に良い対応が得られた⁽⁴⁾.

本研究においては, この疲労寿命推定法の妥当性をさらに検討するため, 同じ仕様の転造ねじ継手を用いた四段四重および四段多重疲労試験を行い, 推定結果と試験結果との比較検討を行った.

2. 疲労寿命推定法

既報に示す等価応力振幅⁽³⁾と多段多重疲労寿命推定法⁽⁴⁾の概要を述べる.

2.1 等価応力振幅 疲労破断位置は最大応力が生じるボルトとナットの第 1 噛合位置のねじ底であるが, 当該部は高い応力集中のために弾塑性状態となり, 二次応力の繰返しによるねじ底応力の変化は, 一次応力によって異なる平均応力を伴ったものとなる.

平均応力が異なる場合に同じ尺度で評価できる応力振幅として, 平均応力が無い完全両振の場合に換算した式(1)の等価応力振幅を用いる. 定応力振幅を繰返した場合と一次公称応力振幅 145MPa 後に二次応力振幅を繰返した場合の, 公称応力 (= 荷重/ねじ底断面積) 振幅 σ_n と等価応力振幅 σ_{eq} の関係を図 1 に示す.

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_T \sigma_r}{\sigma_T - \sigma_m} \quad \dots (1)$$

ここに, σ_m は平均応力, σ_r は応力振幅, σ_T は真破断応力

Fig. 1 σ_{eq} vs. σ_n

2.2 疲労寿命推定法

寿命推定には, 式(2)で示されるように, 累積損傷が 1 に達した時に破断するとする損傷則を用いる. $\alpha_j=1$ の場合は修正マイナー則に対応する.

$$D_i = \sum_{j=1}^i \alpha_j \frac{n_j}{N_{f,j}} = 1 \quad \dots (2)$$

ここに, D_i : i 番目までの累積損傷

α_j : 負荷履歴と累積損傷を考慮した係数

n_j : j 番目の等価応力振幅 $\sigma_{eq,j}$ の繰返し数

$N_{f,j}$: 定応力疲労における等価応力振幅と破寿命の関係を疲労限度以下まで外挿して求めた $\sigma_{eq,j}$ に対する破断繰返し数

式(2)の損傷則を定応力疲労 ($i=1$) に適用すると, $n_1=N_{f,1}$ なので $\alpha_1=1$ となる. 二段二重疲労 ($i=2$) に適用すると, 一次応力の繰返し数比 $n_1/N_{f,1}$ が累積損傷 D_1 に対応している. そこで, D_1 を変えた二段二重疲労試験から得られる損傷に対する損傷後の疲労限度と疲労曲線の傾きとの関係が任意の累積損傷との間にも同じく成立つものと仮定し, さらに $i-1$ 番目と i 番目のそれぞれが二段二重疲労における一段目と二段目に対応するものと考えて係数 α_j を求めると式(3)となり, すべての負荷履歴と累積損傷を考慮した損傷係数であることが分かる.

$$\alpha_j = \alpha_{j-1} \left(\frac{\sigma_{eq,j-1}}{\sigma_{eq,j}} \right)^{C_{pf} D_{j-1}} \quad \text{但し } \alpha_1 = 1 \quad \dots (3)$$

ここに, C_{pf} は材料定数

負荷順に, 各段階での等価応力振幅とその繰返し数をもとに, 式(2)による累積損傷を逐次求め, その値が 1 に達する時の寿命が推定寿命となる. その際, 損傷後の疲労限度よりも低い等価応力振幅は損傷を与えないものとし, その段階の負荷はなかったものと仮定する.

3. 四段四重および四段多重疲労試験条件

図 2 に示す市販の S45C M10 並目の転造後熱処理したボルトおよびナットのねじ継手を用いて, 四段四重と四段多重の疲労試験を行った. いずれの試験も, 最小公称応力を 434MPa (0.2%耐力の 0.6 倍) とした軸方向荷重制御の部分片振り疲労試験で 20Hz で行った. なお, いずれの試験においても, ボルトとナットの第 1 噛合位置で破断した.

四段四重疲労試験は、一次から三次までの応力振幅を所定回数繰返した後、四次応力振幅を破断するまで繰返す疲労試験である。試験条件を表 1 と図 3 に示す。一次から三次までの各公称応力振幅の繰返し数比 $CR_1 \sim CR_3$ (=その応力振幅の繰返し数とその応力振幅を単独に繰返した場合の破断繰返し数との比)はそれぞれが等しく、かつ総和が 0.5 になるようにした。

四段多重疲労試験は、四段の応力振幅を破断するまで繰返す疲労試験である。試験条件を表 2 と図 3 に示す。各段の応力振幅の繰返し数比は、既報⁽⁴⁾と同様に、各段の公称応力振幅それぞれの繰返し数比 $CR_1 \sim CR_4$ は、ひとつ前の段における繰返し数比との比率 A を等しくとり、且つ試験機の都合となるべく多段にすることを考慮して 4 つの繰返し数比の総和が 0.5 になるように決めた。

4. 推定結果と試験結果の比較検討

2 章で述べた疲労寿命推定法を用いて、3 章の疲労試験条件に対する疲労寿命を推定し試験結果と比較検討する。疲労寿命推定には等価応力振幅を用いたが、試験条件との対応を考えて公称応力振幅を用いて整理した。なお、今回用いた転造ねじ継手の定応力疲労試験の結果、疲労寿命が約 2 割短寿命となったため、寿命推定に必要な材料定数は既報⁽³⁾のものに必要な修正を行って寿命推定に用いた。

四段四重疲労試験結果を四次公称応力振幅 $\sigma_{n,4}$ と破断するまでの $\sigma_{n,4}$ の繰返し数 $N_{p,4}$ との関係で整理し、図 4 に示す。疲労限度を低目に推定しているが、この疲労限度近傍を除けば推定結果と試験結果の間には良い対応が得られている。

四段多重疲労試験結果を繰返し数比の比率 A と破断するまでの各段の応力振幅の繰返し数比の総和 D_f との関係で整理し、図 5 に示す。この場合も、推定結果と試験結果の間には良い対応が得られている。

5. 結 言

既報⁽⁴⁾の疲労寿命推定法の適用性を検討するため、S45C, M10 並目の転造ねじ継手を用いて四段四重および四段多重疲労試験を行い、以下の結果が得られた。

(1) 疲労寿命推定結果は試験結果と比較的良好な対応が得られた。これまでの二段二重、三段三重および三段多重疲労に加えて、四段四重および四段多重疲労における寿命推定への適用は可能である。

(2) 疲労寿命推定に必要な材料特性は定応力疲労試験および二段二重疲労試験より得られる。

参考文献

- (1) 瀬戸口・高瀬・真鍋, 機論, 63-613, A(1997), 1849-1853
- (2) 瀬戸口・高瀬・中村・村上, 機論, 66-650, A(2000), 1872-1877
- (3) 瀬戸口・高瀬, 機論, 69-681, A(2003), 902-907
- (4) 瀬戸口・高瀬・山下, 機論, 69-687, A(2003), 1539-1544

Fig. 2 Bolt-nut joint and loading jig

Fig. 3 Load spectrum

Table 1 Test conditions of fatigue under four-step loading

Nominal stress amplitude MPa				Cycle ratio
$\sigma_{n,1}$	$\sigma_{n,2}$	$\sigma_{n,3}$	$\sigma_{n,4}$	$CR_1 \sim CR_3$
90	110	145	70~180	0.5/3
145	110	90	80~180	

Table 2 Test conditions of fatigue under four-level multi-step loading

Nominal stress amplitude MPa				Cycle ratio				A
$\sigma_{n,1}$	$\sigma_{n,2}$	$\sigma_{n,3}$	$\sigma_{n,4}$	CR_1	CR_2	CR_3	CR_4	
70	90	110	145	0.267	0.133	0.0667	0.0334	0.5
				0.125	0.125	0.125	0.125	1.0
145	110	90	70	0.0334	0.0667	0.133	0.267	2.0
				0.0125	0.0375	0.113	0.337	3.0

Fig. 4 $\sigma_{n,4}$ vs. $N_{p,4}$

Fig. 5 A vs. D_f