

## S45C 調質材の二段二重変動荷重下の回転曲げ疲労寿命評価\*

高 瀬 徹\*1

Estimation of Fatigue Life on Heat-Treated 0.45%C Steel  
under Two-Step Rotating Bending

Toru TAKASE\*2

\*2 Department of Mechanical Systems Engineering, Nagasaki University,  
1-14 Bunkyo-machi, Nagasaki-shi, Nagasaki, 852-8521 Japan

Rotating bending fatigue tests were performed using heat-treated 0.45%C steel specimens under the constant amplitude and the two-step loading and then the cumulative fatigue was investigated. Firstly, both the original  $S-N$  curve for the virgin specimen and the  $S-N$  curves for the specimens damaged by prior fatigue were plotted on the double-logarithmic scale. All curves could be linear approximately. The values of the cumulative fatigue damage defined by modified Miner's rule under two-step loading were less than unity. The fatigue life and fatigue limit for the damaged specimen tended lower, as the degree of prior damage increased. Next, the life prediction method for the damaged specimens was proposed. The estimated results were in good agreement with the experimental ones. Then the lower limit of cumulative fatigue damage was examined based on the proposed method. The minimum value of the estimated lower limit was about 0.6, but it was 0.4 when the scatter of the experimental results was considered.

**Key Words:** Fatigue, Life Prediction, Cumulative Fatigue Damage, Two-Step Loading, Iron and Steel

## 1. 緒 言

変動荷重下の疲労寿命推定は、マイナー則<sup>(1)</sup>あるいは疲労限度以下の応力振幅が含まれるような場合には、修正マイナー則に基づいて検討されることが多い。しかし、よく知られているように、破壊するときの累積損傷値は必ずしも1ではない。マイナー自身の試験結果でも、累積損傷値の平均値はほぼ1であるが、試験条件によりその値は0.61~1.49の範囲にある<sup>(1)</sup>。二段二重変動荷重試験の結果をマイナー則により整理すると、一般的傾向として、応力上昇の場合には累積損傷値は1より大きく、応力下降の場合には1より小さいとされている<sup>(2)</sup>。また、試験条件によっては累積損傷値が5以上になることも報告されている<sup>(3)</sup>。

マイナー則が提案された以降も、変動荷重下の疲労寿命推定法として、き裂発生とき裂進展の二段階に分けて考えるモデル、非線形の累積疲労損傷則、等価応力法など多くの研究者により種々の方法が提案されている<sup>(4)</sup>。また、材料のばらつきを考慮して、試験結果

を統計的に取り扱った研究も行われている<sup>(5)</sup>。

一方、実機を安全に使用する立場からは、マイナー則に基づいて変動荷重下の疲労寿命を考える場合、マイナー則の成否と同時に、マイナー則が成立しない場合には、累積損傷値の下限值が重要な意味を持つと思われる。しかし、累積損傷値の全体的な傾向について検討したものに比べ、その下限値についての検討例は少ない。たとえば村上ら<sup>(6)(7)</sup>はき裂の長さを基準として、応力振幅の切替え時期を変えて累積損傷値の下限值について検討し、累積損傷値が0.2まで小さくなる場合があることを示している。

そこで本研究では、S45C 調質材を用いて一定振幅荷重下および高-低二段二重変動荷重下の回転曲げ疲労試験を行い、疲労特性に及ぼす一次応力振幅の影響を明らかにした。また、それらの結果を基に、一次応力振幅を任意の繰返し数だけ繰返しした後の簡便な疲労寿命推定法を示すとともに、その推定法の妥当性について検討し、さらにその推定法に基づく累積損傷値の下限値について検討した。

## 2. 試験片および試験方法

供試材料は市販のS45C 圧延丸棒である。それを845°Cで焼入れ後、600°Cで焼戻しして使用した。化学

\* 原稿受付 2008年10月9日。

\*1 正員, 長崎大学工学部(〒852-8521 長崎市文教町1-14)。

E-mail: takase@nagasaki-u.ac.jp

成分を表1に、熱処理後の機械的性質を表2に示す。供試材料を熱処理後、図1に示す形状・寸法に機械加工し、その後、機械加工層を除去しかつ表面観察を容易にするため、直径5mmの試験部の表面層を電解研磨により約50μm除去したものを試験に供した。試験片は損傷を受ける領域を限定するために浅い部分切欠きを有している。

疲労試験は一定振幅荷重試験および高-低二段二重変動荷重試験を行った。高-低二段二重変動荷重試験においては、一次応力振幅 $\sigma_1$ を490MPa(=1.4 $\sigma_{w0}$ : $\sigma_{w0}$ は処女材の疲労限度)および385MPa(=1.1 $\sigma_{w0}$ )とした。さらに、3・2で述べる疲労寿命推定法の妥当性を検討するための試験においては、 $\sigma_1$ =450MPaとした。なお、損傷の目安としては、取り扱

Table 1 Chemical composition [wt%]

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
0.44	0.19	0.77	0.024	0.015	0.02	0.03	0.14

Table 2 Mechanical properties

$\sigma_{0.2}$ MPa	$\sigma_B$ MPa	$\sigma_T$ MPa	$\delta$ %	$\phi$ %
486	743	1459	24.4	64.9

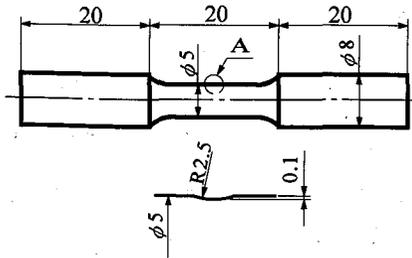


Fig. 1 Dimensions of specimen

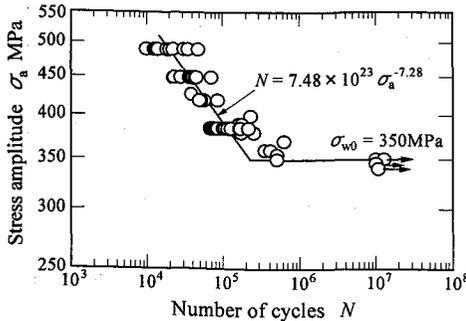


Fig. 2 S-N curve

いが簡単である繰返し数を用いることとした。

試験には小野式回転曲げ疲労試験機(容量15 Nm, 試験周波数50 Hz)を使用した。

### 3. 試験結果および考察

3・1 一定振幅荷重および二段二重変動荷重下の疲労特性 図2に一定振幅荷重試験の結果を表すS-N曲線を示す。縦軸の応力振幅 $\sigma_a$ は、浅い部分切欠きの存在を考慮していない公称応力で整理したものである。S-N曲線の有限寿命域は $N=C\sigma_a^m$ の直線で表され、 $C=7.48 \times 10^{23}$ ,  $m=7.28$ である。また、疲

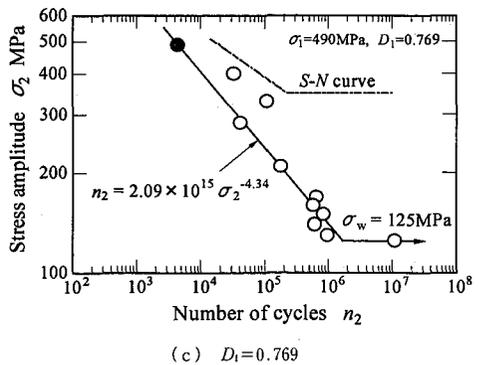
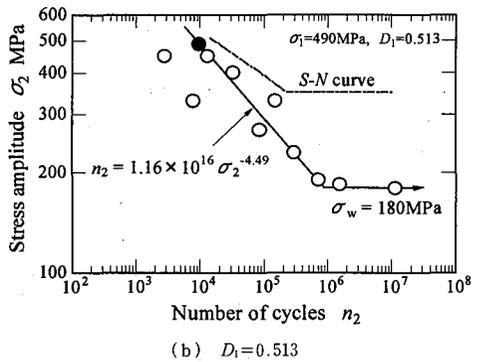
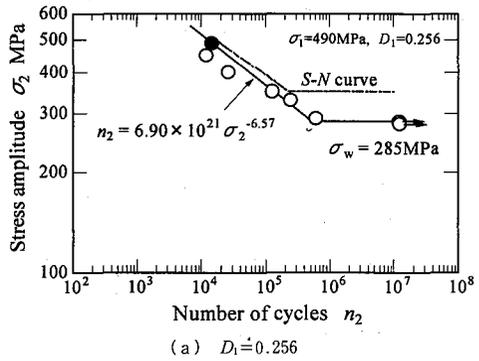


Fig. 3 S-n<sub>2</sub> curve for  $\sigma_1=490$  MPa

労限度  $\sigma_w$  は 350 MPa である。

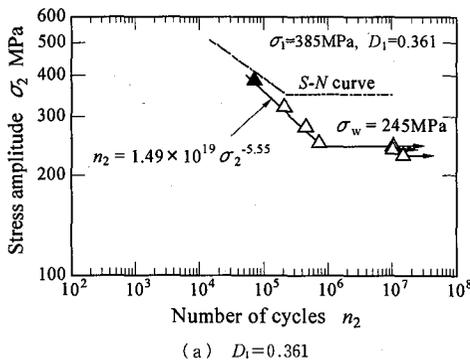
図3は二段二重変動荷重試験で、一次応力振幅  $\sigma_1 = 490$  MPa の場合の試験結果を、二次応力振幅  $\sigma_2$  とその応力振幅の下での破断寿命  $n_2$  の関係で表したものの(以降、 $S-n_2$  曲線と呼ぶ)であり、図4は  $\sigma_1 = 385$  MPa の場合の  $S-n_2$  曲線である。図3および4中の有限寿命域の直線は、それぞれの試験条件において、中実印で示す点を通るように試験結果を最小二乗近似したものである。ここで中実印は、 $\sigma_1$  を単独に繰返した場合の破断寿命  $N_1$  を  $S-N$  曲線から求め、その値から  $\sigma_2$  に切替えるときの  $\sigma_1$  の繰返し数  $n_1$  を差し引いて求めた繰返し数  $(=N_1 - n_1)$  である。つまり、応力振幅切替え時点における  $\sigma_1$  の下での残寿命を表している。また図中の  $D_1$  は、 $\sigma_1$  の繰返し数比  $(n_1/N_1)$  として定義した損傷値である。図3からわかるように、 $D_1$  が大きくなるとともに、疲労限度が低下している。また  $D_1$  が大きくなると、 $\sigma_2$  の下での破断寿命が短くなり、有限寿命域の直線の傾きも急になっている。図4においても同様に、 $D_1$  が大きくなるとともに疲労限度は低下し、直線の傾きも急になる傾向が見られる。

図5は、図3および4に示した試験結果を修正マイナー則により整理したものである。横軸は  $\sigma_1$  による

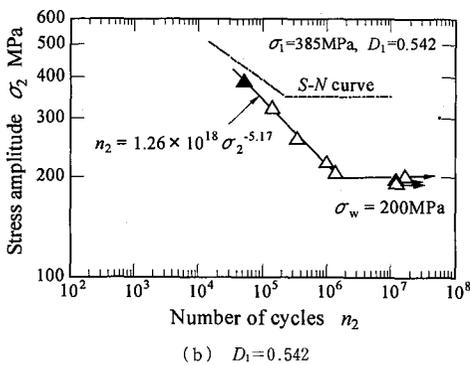
損傷値  $D_1 (=n_1/N_1)$  であり、縦軸の  $D_{exp}$  は  $D_1$  と  $\sigma_2$  による損傷値  $D_2 (=n_2/N_2)$  の和  $(=D_1 + D_2)$  として求めた累積損傷値である。ここで、 $N_2$  は  $\sigma_2$  を単独に繰返した場合の破断寿命であり、 $S-N$  曲線から求めた。図より  $\sigma_1$  および  $D_1$  の大きさに依らず、累積損傷値は全体として1より小さくなりマイナー則は成立せず、その値は0.5まで小さくなるのがわかる。そこで、以下では累積損傷値の下限値について検討する。

**3・2 二次応力振幅下での疲労寿命の推定** 累積損傷値の下限値について検討する前に、二次応力振幅  $\sigma_2$  の下での疲労寿命推定法について考える。図3および4に示したように、 $S-n_2$  曲線は、2本の直線で近似できるので、一次応力振幅  $\sigma_1$  を任意の繰返し数  $n_1$  だけ繰返された後の  $S-n_2$  曲線は、疲労限度  $\sigma_w$ 、 $n_2 = C_2 \sigma_2^{m_2}$  の関係で表される有限寿命域を表す直線の傾き  $m_2$  およびその直線が通過する一つの点が見られる。

まず図3および4に示した結果より、 $\sigma_1$  の下での損傷値  $D_1$  と疲労限度  $\sigma_w$  の関係を表すと図6のようになる。図からわかるように、 $D_1$  が大きくなるとともに、 $\sigma_w$  が低下している。さらに、 $\sigma_1$  の大小による差は認められず、良い相関が得られている。そこで、



(a)  $D_1 = 0.361$



(b)  $D_1 = 0.542$

Fig. 4  $S-n_2$  curve for  $\sigma_1 = 385$  MPa

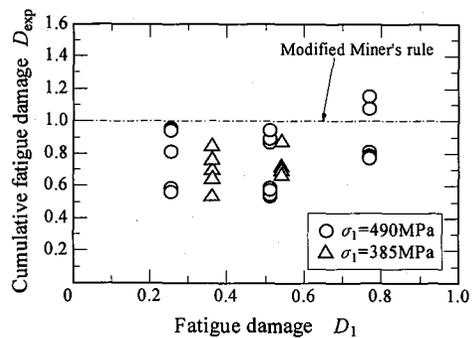


Fig. 5 Cumulative fatigue damage

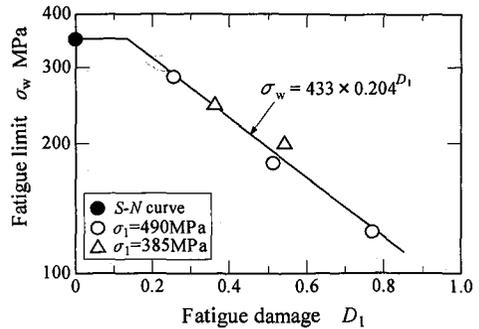


Fig. 6  $\sigma_w$  vs.  $D_1$

$\sigma_1=490\text{ MPa}$  と  $385\text{ MPa}$  の試験結果をまとめて最小二乗近似した。その際、 $D_1$  が小さいときは、疲労限度は変化しないと仮定した。

次に、 $D_1$  と  $S-n_2$  曲線の傾き  $m_2$  との関係を表すと図7のようになる。 $D_1$  と  $m_2$  の関係も  $\sigma_1$  の大小に依存せず、良い相関が得られ、一本の直線で表されることがわかる。そこで図2, 5および6を用いると、以下の手順により、 $\sigma_1$  を任意の繰返し数  $n_1$  だけ繰返された後の  $S-n_2$  曲線を推定することができる。

- (1) 一次応力振幅  $\sigma_1$  の繰返し数  $n_1$  を任意に決める。
- (2) 一次応力振幅  $\sigma_1$  を単独に繰返した場合の破断寿命  $N_1$  を図2の  $S-N$  曲線から求め、損傷値  $D_1$  ( $=n_1/N_1$ ) を算出する。
- (3) 損傷値  $D_1$  に対する疲労限度  $\sigma_w$  を図6より求める。
- (4) 損傷値  $D_1$  に対する  $S-n_2$  曲線の傾き  $m_2$  を図7より求める。
- (5) (2) で求めた破断寿命  $N_1$  から繰返し数  $n_1$  を差し引き、一次応力振幅  $\sigma_1$  の下での残寿命 [ $=N_1 - n_1$ :  $S-n_2$  曲線における中実印(図3および4参照)] を求める。
- (6) (5) で求めた点を通るように傾き  $m_2$  の

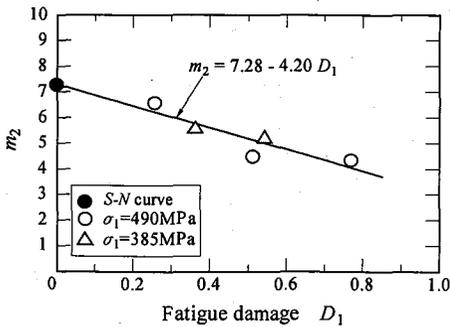


Fig. 7  $m_2$  vs.  $D_1$

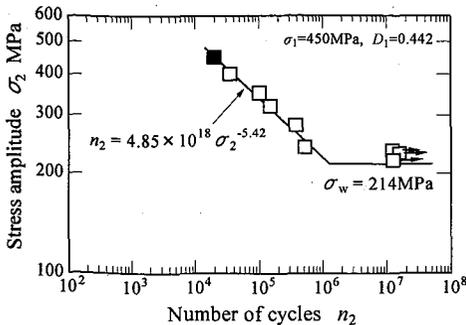


Fig. 8 Estimated  $S-n_2$  curve and experimental results

直線を引き、疲労限度  $\sigma_w$  を表す水平線と結ぶ。

以上の(1)から(6)の手順により  $\sigma_1=450\text{ MPa}$ ,  $n_1=16\ 000$  ( $D_1=0.442$ ) の場合について  $S-n_2$  曲線を推定し、試験結果とともに図8に示す。図からわかるように、 $\sigma_w$  はやや低い推定結果となっているが、推定した  $S-n_2$  曲線と試験結果の間には良い対応が認められる。

**3.3 累積損傷値の下限値の検討** 二段二重変動応力下の試験結果を修正マイナー則によって整理する場合、 $S-N$  曲線と  $S-n_2$  曲線が平行な場合には累積損傷値は1となる。しかし、今回の結果では図3および4に示したように、両曲線は平行ではなく、 $S-n_2$  曲線は  $S-N$  曲線よりも傾きが急になる傾向が見られるので、累積損傷値は1以下になり、しかも二次応力振幅  $\sigma_2$  が、その試験条件における疲労限度に等しいときに累積損傷値が下限値になることがわかる。そこで、3.2に述べた推定法に基づき修正マイナー則による累積損傷値を以下の手順により推定し、その下限値について検討する。

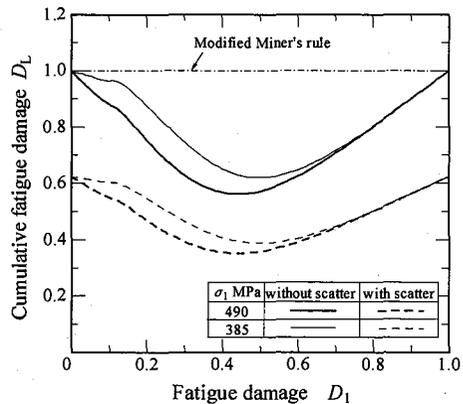


Fig. 9 Lower limit of estimated cumulative fatigue damage

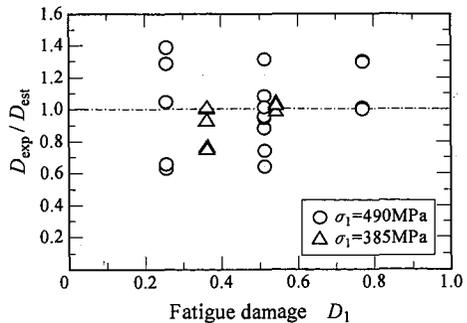


Fig. 10 Ratio of experimental results to estimated cumulative fatigue damage

(1) 一次応力振幅  $\sigma_1$  の繰返し数  $n_1$  あるいは損傷値  $D_1$  を任意に決める。

(2) 3・2 に述べた方法により  $S-n_2$  曲線を推定する。

(3) 応力振幅を切り替え後、二次応力振幅  $\sigma_2$  による破断寿命 ( $=n_2$ ) を (2) で推定した  $S-n_2$  曲線より求める。

(4) 二次応力振幅  $\sigma_2$  を単独に繰返した場合の破断寿命  $N_2$  を  $S-N$  曲線より求め、 $\sigma_2$  による損傷値  $D_2$  ( $=n_2/N_2$ ) を求める。

(5) 損傷値  $D_1$  と  $D_2$  の和として累積損傷値  $D_{est}$  ( $=D_1+D_2$ ) を求める。

以上の手順の (3) において、 $\sigma_2$  として図 6 より求めた  $\sigma_w$  を用いると、前述したように累積損傷値の下限值を求めることができる。そこで、 $\sigma_1=490$  および  $385$  MPa の場合について累積損傷値の下限值  $D_L$  を求めると、図 9 の太い実線および細い実線のようになる。図からわかるように、 $\sigma_1$  が大きいほど下限値は小さくなる。また、いずれの  $\sigma_1$  の場合も  $D_1=0.4\sim 0.5$  で、 $D_L$  は最も小さくなり、その最小値は、 $\sigma_1=490$  MPa の場合には、 $D_1=0.44$  のときに  $0.56$ 、 $\sigma_1=385$  MPa の場合には、 $D_1=0.49$  のときに  $0.62$  となる。

ここで、累積損傷値の推定結果  $D_{est}$  と試験結果  $D_{exp}$  を比較すると図 10 のようになる。推定結果と試験結果との比は全体として  $0.63\sim 1.39$  の範囲にある。そこで、図 10 に示したばらつきを考慮し、さらに  $\sigma_1=490$  MPa と  $385$  MPa でのばらつきの程度が同じであると仮定すると、 $D_L$  の変化は図 9 の太い破線および細い破線で示したようになり、ばらつきを考慮しない場合に比べてさらに小さくなる。つまり、 $D_L$  の最小値は、 $\sigma_1=490$  MPa の場合には  $0.35$ 、 $\sigma_1=385$  MPa の場合には  $0.39$  となる。

以上のように、本試験条件の下では、一次応力振幅の大きさにより多少の差はあるが、累積損傷値の最小値は約  $0.6$  であり、材料による試験結果のばらつきを考慮すると約  $0.4$  まで下がると考えられる。

#### 4. 結 言

S45C 調質材を用いて、一定振幅荷重下および高-低

二段二重変動荷重下の回転曲げ疲労試験を行い、以下の結果が得られた。

(1) 一次応力振幅による損傷値が大きくなると、疲労限度は低下し、有限寿命域を表す直線の傾きは急になるが、この傾向は一次応力振幅の大きさには依存しない。

(2) 一次応力振幅を任意の繰返し数だけ繰返された後の二次応力振幅下での簡便な疲労寿命推定法を提案した。

(3) 提案した疲労寿命推定法に基づき累積損傷値の下限值を検討した結果、一次応力振幅が大きいほど下限値は小さくなるが、一次応力振幅の大きさに関係なく、損傷値が  $0.4\sim 0.5$  の範囲で下限値は最小となる。

(4) 一次応力振幅の大きさにより多少の差はあるが、推定された累積損傷値の最小値は約  $0.6$  であり、材料による試験結果のばらつきを考慮すると約  $0.4$  まで下がる。

#### 文 献

- (1) Miner, M. A., Cumulative Damage in Fatigue, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 12 (1945), pp. A 159-A 164.
- (2) The Society of Materials Science, Japan ed., *Strength of Materials* (in Japanese), (2005), p. 117, The Society of Materials Science, Japan.
- (3) Schijve, J., *Fatigue of Structure and Materials*, (2001), p. 252, Kluwer Academic Publishers.
- (4) Fatemi, A. and Yang, L., Cumulative Fatigue Damage and Life Prediction Theories: A Survey of the State of the Art for Homogeneous Materials, *International Journal of Fatigue*, Vol. 20, No. 1 (1998), pp. 9-34.
- (5) Shimokawa, T. and Tanaka, S., A Statistical Consideration of Miner's Rule, *International Journal of Fatigue*, Vol. 2, No. 4 (1980), pp. 165-170.
- (6) Murakami, Y. and Matsuda, K., Role of Small Cracks and Understress in Prediction of Fatigue Life under Two-Step Stress Loading, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 36, No. 409 (1987), pp. 1065-1070.
- (7) Murakami, Y. and Matsuda, K., Correlation between Behavior of Small Cracks and Variation of Cumulative Fatigue Damage under the Multiple Repeated Two-Step Stress Loading, *Journal of the Society of Materials Science, Japan*, Vol. 38, No. 433 (1989), pp. 1188-1193.