炭素鋼 S35C 材の繰返し 2 段変動荷重下の 疲労寿命の確率特性*

城 野 政 弘** 出 石 智 也*** 菊 川 真**

Statistical Study on Fatigue Lives of a Carbon Steel, S35C, under Repeated Two-Step Loadings

by

Masahiro JONO

(Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Suita)

Tomoya IZUSHI

(Nippon Kokan K.K., Fukuyama)

and Makoto KIKUKAWA

(Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Suita)

Fatigue tests were conducted on smoothed specimens of a carbon steel, S35C, under repeated two-step loadings as well as constant amplitude stresses, and the probabilistic characteristics of fatigue lives under varying loading conditions were examined by considering the both relations of stress-plastic strain and of plastic strain-fatigue life.

The main results obtained are as follows; (1) The distribution of fatigue lives was found to be represented by log-normal distributions for both constant stress amplitude and repeated two-step loading tests. (2) Although fatigue lives under the constant stress amplitude tests showed a fairly large scatter at a stress level near the fatigue limit, those under the varying loading tests did not show such a large scatter at that level and a slightly increasing tendency of the standard deviation of fatigue life with the increase of fatigue life was found in the region below the fatigue limit. (3) Little correlation was found between the variances of the stress-plastic strain relation and of the plastic strain-fatigue life relation for the varying loading tests, and it was found that the variance of the former relation was very much smaller than that of the latter one. Therefore, the variance of the stress-fatigue life relation for the varying loading tests of a particular load pattern was concluded to be determined by the variance of the plastic strain-fatigue life relation.

(Received June 2, 1980)

キー・ワード：疲労寿命，破壊確率，対数正規分布，繰返し 2 段変動試験

1 緒 言

近年，機械・構造物の設計問題における信頼性工学に対する関心の高まりとともに，各種材料の疲労強度の確率分布特性についての研究も活発に行われてきている¹⁾。しかしながらそれらのほとんどは耐久限度以上の一定応力振幅試験により寿命分布あるいは強度分布を求めようとするものである。一方，実際の機械・構造物に作用する荷重は振幅，周期が複雑に変化する変動荷重であり，実際の機械・構造物の信頼性設計には変動荷重下の疲労強度の確率特性を把握することが重

要となる。このような変動荷重下での疲労寿命の確率特性²⁾³⁾についての研究はきわめて少い。また，最近この種の研究として累積疲労損傷値の分布についての考察⁴⁾がなされているが，その場合は種々の試験条件の結果を区別せず含めているため，荷重パターンの相違による寿命の変動と材料強度の確率特性が必ずしも分離されていないものと思われる。

筆者らは，これまでに変動荷重下の疲労強度を調べるために，正規性のランダム荷重や耐久限度以下の応力に小ひん度の過大応力を周期的に加えた 2 段繰返し変動荷重による疲労試験を行い，変動荷重下では，耐久限度以下の低応力でも疲労損傷が累積し破断に至るが，その場合の寿命推定については，第 1 近似として

* 原稿受理 昭和55年 6 月 2 日

** 正 会 員 大阪大学工学部 吹田市山田上

*** 日本鋼管(株)福山製鉄所 福山市

は塑性ひずみレンジペアの a 乗 ($a \approx 2$) に比例した損傷が繰返し数に対し線形に累積すると考えた線形累積損傷則が良く成立することを報告した。

そこで本研究では、炭素鋼 S35C 平滑材を用いて、引張圧縮の 2 段繰返し変動試験を行うこととし、荷重レベル、高低荷重の変動周期を変えた数種類の荷重パターンを選び、各条件につき出来るだけ多数の試験を行い、同一荷重パターンにおける変動荷重下の疲労寿命の確率特性を、応力-塑性ひずみ関係と、塑性ひずみ-寿命関係にわけて考察することを試みた。

2 供試材料および試験片

供試材料は、JIS 規格の S35C 相当の炭素鋼焼準材で、一つのピレットから連続して圧延された 28 mm ϕ の丸棒を 880℃ で 1.2 時間保持後、空冷したものである。その化学成分、機械的性質を Table I, II に示す。試験片は、繰返し塑性ひずみの検出が容易なように、Fig. 1 に示す、平行部直径 3.5 mm、平行部長さ 12 mm の形状とし、旋盤加工の後、円周方向の旋削傷がなくなるまで、0/4 エメリー紙で磨いて仕上げ、試験に供した。

3 試験方法および試験結果の整理方法

試験装置は動電形引張圧縮試験機を用い、塑性ひずみの検出には容量形ひずみ形を用いた。試験周波数は 40 Hz である。試験条件を Table III に、2 段繰返し荷重波形の説明を Fig. 2 に示す。試験条件 A, B は一定振幅試験であり、耐久限度以上で、それより充分高いレベルと、耐久限度近傍の 2 レベルに選んだ。試験条件 C~H は繰返し 2 段変動試験であり、高低荷

Table I. Chemical composition of material investigated (%).

Material	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
S35C	0.38	0.72	0.25	0.010	0.015	0.04	0.02	0.13

Table II. Mechanical properties of material investigated.

Material	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area ϕ (%)	Fracture ductility* ϵ_f (%)
S35C	38.0	62.4	23.7	58.5	88.0

$$* \epsilon_f = \ln\left(\frac{1}{1-\phi}\right)$$

Fig. 1. Configuration of test specimen.

Loading pattern C~F

Loading pattern G

Loading pattern H

Fig. 2. Illustration of loading patterns of repeated two-step tests.

重のひん度は主として $n_1=1, n_2=160$ とした。ここに、 n_1, n_2 は高、低レベル応力の 1 ブロック内の繰返し数である。(以後 $n_1/n_2=1/160$ と表す。) 条件 C~F は両振りの 2 段繰返しで応力レベルを変化させたものの、条件 G は応力レベルは E と同じであるが、高、低レベル応力の ひん度比の値を、全体では 1/160 であるが、1 ブロック内の繰返し数をそれぞれ $n_1=32, n_2=5120$ とし、高低に変動する回数を少くしたものである。また条件 H は条件 F の応力波形で、低レベル応力に引張の平均応力を付加し、応力の最大値を一定にそろえたものである。

試験は各条件につき 10 本ずつ行ったが、わずかに 10 本の試験結果よりばらつきを見積るため、大きく飛び離れた点が出てくると誤った評価をする恐れがあるので、そのような場合は 1 本の追加試験を行うことで全体を 11 本として、異常に飛び離れた点はグラフ上でかっこを付けて示し、データ整理からはひとまず除外した。除外の基準としては、Dixon および Grubbs の棄却検定において有意水準 5% で棄却される点とした。また $\sigma=26.0 \text{ kg/mm}^2$ の一定振幅試験では 10^7 回で非破断点が認められたが、この場合も同様に追加試験を行って、非破断点はデータ整理から除いた。

2 段変動荷重下の疲労寿命の整理には、低レベル塑性ひずみに対する破断繰返し数 N_{2e}^* を、塑性ひずみに関して高低両レンジペアに対する線形累積損傷則が成立すると仮定し、次式により推定した。

$$N_{2e}^* = n_2 / (1 - n_1 / N_{1e}) \quad (1)$$

ただし、 N_{1e} は高レベル応力により生ずる等価塑性ひずみレンジペア $\Delta \epsilon_p \tilde{\epsilon}_{p1} (\Delta \epsilon_p \tilde{\epsilon}_{p1})$ は、塑性ひずみレンジ

Table III. Test conditions.

		σ_1 (kg/mm ²)	σ_2 (kg/mm ²)	n_1/n_2
Constant amplitude test	A	31.0		—
	B	26.0		—
Repeated two-step test	C	37.0	31.5	1/160
	D	31.5	26.0	1/160
	E	31.5	21.0	1/160
	F	31.5	17.0	1/160
	G	31.5	21.0	32/5120
	H	31.5	17.0 ($R=-0.08$)	1/160

ペア $4_{rp}\varepsilon_{p1}$ の破断までの繰返し数に対する2乗平均値⁶⁾に対する破断繰返し数で、この値は一定振幅試験結果より求める。また n_1 , n_2 はそれぞれ高低レベルの応力(塑性ひずみ)レンジペアの破断までの総繰返し数である。(応力を基準とした1式の整理では、添字 ε の代りに σ を付して示す。)なおこの際、低レベル塑性ひずみに対する寿命推定の誤差をできるだけ小さくするため、 $4_{rp}\varepsilon_{p1}$ に対する損傷値 n_1/N_{1e} は 0.3 を越えないように試験条件を設定した。

なお、応力あるいは塑性ひずみレンジペアに対する疲労寿命ならびに応力に対する塑性ひずみの大きさの平均値、ばらつきは、以下の式に示すようにそれぞれ対数平均値 $\bar{X}_k$ ならびに常用対数をとったものの標準偏差 $\sqrt{V_{X_k}}$ (不偏分散の平方根) で示すこととする。即ち

$$\log \bar{X}_k = \frac{\sum_{i=1}^n \log X_{ki}}{n} \quad (2)$$

$$\sqrt{V_{X_k}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log X_{ki} - \log \bar{X}_k)^2}{(n-1)}} \\ = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\log X_{ki} / \bar{X}_k)^2}{(n-1)}} \quad (3)$$

ここに X_k は対象とする寿命 N あるいは塑性ひずみ $\Delta\varepsilon_p$ を代表的に表すものである。

4 試験結果および考察

4・1 一定応力振幅試験

Fig. 3 に応力-寿命関係を示す。○印は確率特性を求めるため $\sigma=31, 26 \text{ kg/mm}^2$ で行った試験結果、⊕印はそれ以外の応力レベルの試験結果であり、また●印の点は、同一材料による既発表の結果である。 $\sigma=31 \text{ kg/mm}^2, 26 \text{ kg/mm}^2$ に対する破壊確率を、対数正規確率紙にプロットした $P-N$ 線図を Fig. 4 に示す。これより両者の分布はほぼ対数正規分布で近似できることがわかるが、耐久限度に近い $\sigma=26 \text{ kg/mm}^2$ の場合には分散が大きくなり、また破断しないものも混じる。このような非破断点の処理については、田中ら⁸⁾による混合分布による取扱いや山田らによる変動有限極値分布による取扱い等が提案されているが、いずれの場合も、非破断点を含めた疲労寿命の分布形は、グラフ上で大きく長寿命側に曲がることになり、耐久限

Fig. 3. S-N diagram for constant stress amplitude test.

Fig. 4. $P-N$ diagram for constant stress amplitude test.

度近傍の応力レベルでは、対数正規分布からはずれることになるが、ここでは、このような非破断点はひとまず除外し、破断点のみの分布について考えておくことにする。

応力の繰返しに伴う塑性ひずみの変化の様子を Fig. 5 に示す。図には、 $\sigma=31 \text{ kg/mm}^2$ の場合と 26 kg/mm^2 の場合の両条件に対し、試験した10本の試験片のうちの塑性ひずみが最大と最小のもののみを示すが、最大と最小の差は、 $\sigma=26 \text{ kg/mm}^2$ の方がやや大きいことがわかる。次にこのように変化する塑性ひずみに対し、2乗平均で等価塑性ひずみレンジ $\Delta\varepsilon_p$ を計算し、これと破断繰返し数の関係を Fig. 6 に示す。Fig. 3 と比較すれば、塑性ひずみ-寿命関係の方が応力-寿命関係よりばらつきが小さくなっていることがわかるが、これをより明かにするため以下の方法により寿命の分布を計算した。

一定応力振幅試験では、応力が同じでも応力-塑性ひずみ関係にばらつきが存在するため、等価塑性ひずみは同じにならない。また塑性ひずみを制御して同一

Fig. 5. Variation of plastic strain under constant stress amplitude tests.

Fig. 6. $\Delta\varepsilon_p-N$ diagram for constant stress amplitude test.

等価塑性ひずみに対する多数の試験結果を求めることも困難である。そこでここでは同一応力レベルでの試験結果を同一等価塑性ひずみに対する寿命に換算して寿命分布を求めた。即ち同一応力で試験された10本の試験結果から、塑性ひずみレンジの対数平均値 $\bar{\Delta\epsilon_p}$ を求め、各塑性ひずみレンジ $\Delta\epsilon_p$ に対する破断繰返し数 N を、 $\bar{\Delta\epsilon_p}$ - N 曲線の傾きを考慮して、これと平行に移動させ、同一塑性ひずみレンジ $\bar{\Delta\epsilon_p}$ に対する寿命 N' に換算し、塑性ひずみ-寿命関係における P - N' 線図を求めた。結果を Fig. 7 に示す。この場合も、 $\bar{\Delta\epsilon_p}=0.125\%$ ($\sigma=26 \text{ kg/mm}^2$) では耐久限度に近いためばらつきは大きい、 $\bar{\Delta\epsilon_p}=0.321\%$ ($\sigma=31 \text{ kg/mm}^2$) ではばらつきは小さく、しかも先の応力-寿命関係における対数寿命の標準偏差 $1/\sqrt{V_N}=0.073$ に比して、この場合の標準偏差は $1/\sqrt{V_{N'}}=0.041$ と約半分となり、塑性ひずみ-寿命関係の方が信頼限界の幅が小さくなることわかる。(各試験条件に対する平均値、標準偏差の値は後述の Table IV 参照)

Fig. 7. P - N' diagram for constant stress amplitude test.

4.2 2 段繰返し変動荷重試験

(1)式により推定した N_{2e}^* と低レベル応力に対する等価塑性ひずみレンジ $\Delta_{rp}\bar{\epsilon}_{p2}$ の関係を Fig. 8 に示す。また N_{2e}^* を一定応力振幅試験の場合と同様に、各試験条件における $\Delta_{rp}\bar{\epsilon}_{p2}$ の対数平均値に対する寿命 N_{2e}^* に換算し、 P - N_{2e}^* を求め Fig. 9 (a), (b) に示す。Fig. 9 より試験した 6 条件とも寿命はほぼ対数正規分布をしているとみなせる。したがってここでは、各条件の 10 点の試験点に対し最小 2 乗法による直線のあてはめを行い、これより求めた破壊確率 50% の点を一点鎖線で、また 10% および 90% の破壊確率線を破線で Fig. 8 に示した。また比較のため、 $\sigma=31 \text{ kg/mm}^2$ および 26 kg/mm^2 の一定応力振幅試験結果についても同様の整理を行い、80% の信頼限界の幅として Fig. 8 に示した。また Fig. 10 には、各試験条件に対する寿命の対数平均値と対数寿命の標準偏差の関係を示す。(各数値は Table IV の第 7, 8 欄に示す) これらの図より、塑性ひずみ-寿命関係のばらつきは、耐久限度より充分塑性ひずみが大きいところでは、一定応

Fig. 8. P - $\Delta_{rp}\bar{\epsilon}_{p2}$ - N_{2e}^* diagram for repeated two-step test.

(a) Test conditions C-F.

(b) Test conditions G and H.

Fig. 9. P - N_{2e}^* diagram.

Fig. 10. Relation between mean of fatigue life and its standard deviation.

力振幅試験の場合と大差ないが、耐久限度近傍では、一定応力振幅試験の標準偏差 $1/\sqrt{V_{N'}}=0.154$ に比べて $1/\sqrt{V_{N_{2e}^*}}=0.086$ と約半分程度に小さくなり、またこの値は塑性ひずみが減少するにつれて増加するが、 $\Delta_{rp}\bar{\epsilon}_{p2}=0.01\%$ ($N_{2e}^*=3 \times 10^6$) でも $1/\sqrt{V_{N_{2e}^*}}=0.116$ と若干増加する程度であることがわかる。したがって、耐久限度近傍で塑性ひずみ-寿命関係が大きくばらつくのは一定応力振幅試験特有のものであり、変動荷重により耐久限度が消失すると、耐久限度近傍でのばら

Table IV. Test results, logarithmic mean and standard deviation of fatigue lives and plastic strain range-pair.

Test condition	Stress (kg/mm ²)	Stress-fatigue life relation		Stress-plastic strain relation		Plastic strain-fatigue life relation	
		Logarithmic mean	Standard deviation	Logarithmic mean	Standard deviation	Logarithmic mean	Standard deviation
		$\bar{N}, \bar{N}_{2\sigma}$	$\sqrt{V_N}, \sqrt{V_{N_{2\sigma}}}$	$\overline{\Delta \varepsilon_p}, \overline{\Delta \varepsilon_{p2}} (\%)$	$\sqrt{V_{\Delta \varepsilon_p}}, \sqrt{V_{\Delta \varepsilon_{p2}}}$	$\bar{N}, \bar{N}_{2\sigma}^*$	$\sqrt{V_N}, \sqrt{V_{N_{2\sigma}^*}}$
A	31.0	4.51×10^4	0.073	0.321	0.040	4.51×10^4	0.041
B	26.0	3.68×10^5	0.181	0.125	0.058	3.68×10^5	0.154
C	37.0	—	—	0.804	0.035	—	—
	31.5	3.59×10^4	0.078	0.355	0.030	3.49×10^4	0.048
D	31.5	—	—	0.319	0.017	—	—
	26.0	2.33×10^5	0.086	0.132	0.016	2.31×10^5	0.086
E	31.5	—	—	0.351	0.020	—	—
	21.0	9.28×10^5	0.084	0.0396	0.020	9.23×10^5	0.083
F	31.5	—	—	0.321	0.016	—	—
	17.0	3.34×10^6	0.144	0.0132	0.012	2.98×10^6	0.116
G	31.5	—	—	0.350	0.037	—	—
	21.0	1.72×10^6	0.148	0.0363	0.033	1.69×10^6	0.106
H	31.5	—	—	0.405	0.018	—	—
	17.0 ($R=-0.08$)	9.57×10^5	0.097	0.0128	0.022	1.00×10^6	0.083

つきはさほど大きくはならず, さらに塑性ひずみが減少し長寿命となっても, 荷重ひん度比が極端に小さくなり破断しない試験片が混ってこない限りは, ばらつきは急激には増加しないことがわかる。

つぎに, 高低の荷重ひん度のトータルの比の値は1/160で同じであるが, $n_1/n_2=32/5120$ と荷重変動周期を長くした試験条件Gについてみると, Fig. 8に示したように同一応力条件の $n_1/n_2=1/160$ (条件E)と比較して寿命の対数平均値は有意水準1%で長寿命であることがわかり, ひん度比の値が同じでも高低に変動する回数が多いほど短寿命になることを示している。また△印の結果より高低応力のひん度が同じでも, 低レベル¹⁰⁾応力に引張の平均を加えた場合には, さらに短寿命となることがわかるが, これらの場合にも, Fig. 10に示したように寿命に対する標準偏差の大きさは, 両振りの $n_1/n_2=1/160$ の2段繰返し試験の場合とあまり変わらないことがわかる。したがって, 荷重変動周期の変化や, 低レベル応力に付加される平均応力による効果は, 寿命の平均値に対して強く影響するが, それらの荷重パターンにより試験片が破断する限りは, その寿命に対するばらつきにはあまり大きな変化を与えないものと思われる。

つぎに応力-塑性ひずみ関係について述べる。Fig. 11は, 低レベルの各応力に対して同一の試験条件の10点についての対数平均値として $\overline{\Delta \varepsilon_p \varepsilon_{p2}}$ を求めた応力-

塑性ひずみ関係の曲線であり, またこれらの対数平均値ならびに標準偏差を Table IV の第5, 6欄に示す。応力-塑性ひずみ関係は試験した範囲では, 一定応力振幅試験と, 2段変動試験でほとんど変わらないが, 変動試験における塑性ひずみのばらつきは, 応力が耐久限度よりも充分高い $\sigma=31.5$ kg/mm² 近傍では一定応力振幅試験のそれとあまり変わらないものの, 耐久限度近傍の $\sigma=26$ kg/mm² では一定応力振幅試験に比べてはるかに小さく, また耐久限度以下の領域を含めて $n_1/n_2=32/5120$ の場合を除いてはほぼ一定で, 標準偏差 $\sqrt{V_{\Delta \varepsilon_p \varepsilon_{p2}}}$ の値は約0.02ときわめて小さいことがわかる。この値は, 塑性ひずみ-寿命関係のばらつきとそのままでは直接比較することはできないが, Fig. 8でみたように, $\Delta \varepsilon_p \varepsilon_{p2} - N_{2\sigma}^*$ 曲線の傾きは, 耐久限度近傍より下の領域ではほぼ1となることから, 上記

Fig. 11. Relation between stress and plastic strain range-pair.

の標準偏差は、そのまま塑性ひずみ-寿命関係の標準偏差（この値は Fig. 10 よりほぼ 0.1）と比較でき、約 1/5 程度であることがわかる。

以上に得られた結果より応力-塑性ひずみ関係と塑性ひずみ-寿命関係との相関を調べてみる。Fig. 12 は、縦軸に応力に対する塑性ひずみ応答の変動として、試験条件 C～F の各試験に対する等価塑性ひずみレンジペアをそれぞれの試験条件に対する等価塑性ひずみレンジペアの対数平均値で無次元化した値をとり、横軸に、塑性ひずみに対する寿命の変動を、同様に各試験条件に対する寿命の対数平均値で無次元化して表し、両者の相関を調べた図である。

Fig. 12. Correlation of variance between stress-plastic strain relation and plastic strain-fatigue life relation.

相関係数は $r=0.05$ となり、ほぼ無相関といえる。したがって両者の関係における分散を加え合わせると、応力-寿命関係の分散が求まることになるが、今の場合、前述のように塑性ひずみ-寿命関係の分散に比して、応力-塑性ひずみ関係の分散が極めて小さい（耐久限度以下の領域では約 1/25）ため、応力-寿命関係の分散は、ほぼ塑性ひずみ-寿命関係の分散で求まることになる。したがって本材料に関する限り、定常な変動荷重下の疲労寿命についての確率特性を求めるためには、実用上応力に基づいた線形累積損傷則を仮定して、高レベル応力に対する破壊繰返し数を一定振幅試験の $S-N$ 曲線から求め形式的に(1)式で直接寿命推定を行い N_{2e}^* を求めても大差ないことになる。そのようにして求めた応力-寿命関係を Fig. 13 に、その平均値ならびに標準偏差の値を Table IV の第 3, 4 欄に示す。耐久限度より応力が充分高い領域では、応力-塑性ひずみ関係のばらつきが大きいため、推定された寿命のばらつきは、塑性ひずみに基づいて推定された Fig. 8 に比べて大きくなっているが、耐久限度近傍からそれ以下の領域に関しては、ほぼ同程度のばらつきとなっている。

4・3 疲労寿命の分布形についての考察

本研究では、変動荷重下の疲労寿命を支配する第一

Fig. 13. $P-\Delta_r p \sigma_2 - N_{2e}^*$ diagram for repeated two-step test.

因子として繰返し塑性ひずみをとりあげ、試験中連続してそれを測定したため試験に多大の労力と時間を要し、現在までのところ各試験条件に対し10本ずつの結果しか得られていない。したがって前節までで考察した変動荷重下の疲労寿命分布についてはたかだか破壊確率10～90%の範囲での推論である。しかしながら実際の設計問題においては中心値付近の分布よりもむしろ破壊確率の小さい裾野周辺の分布がより重要となる。したがってここでは若干厳密性は欠くが、得られているデータをいくつかの方法で基準化し、これらをプールすることにより、等価塑性ひずみレンジペアに対する疲労寿命のより広い破壊確率の範囲での分布形状について検討する。

まず第1の方法は、それぞれの試験条件毎に規準対数正規分布に引き直しプールする方法である。本研究で用いた試験条件のうち比較的条件的等しいと考えられる $n_1/n_2=1/160$ の両振り波形（条件C～F）について、 $U = (\log N_{2e}^* - \log \bar{N}_{2e}^*) / \sqrt{V_{N_{2e}^*}}$ （ただし対数寿命の平均値 $\bar{N}_{2e}^*$ 、標準偏差 $\sqrt{V_{N_{2e}^*}}$ は各試験条件ごとの値を採用する）を横軸にとり40本の結果をプールした破壊確率を Fig. 14 に、規準対数正規分布の直線とともに示す。下方で若干直線からずれるが、ほぼ規準対数正規分布とみなしてよいと思われる。

第2の方法は、耐久限度近傍以下ではばらつきにあまり大きな相違がなかったことから、平均値との寿命比をとって基準化する方法である。低レベル応力が耐久限度近傍あるいはそれ以下である条件D～Hについてプールしたものを Fig. 15 に示す。これより寿命比の分布は広い範囲で対数正規分布とよく一致しており、90%の信頼区間で、寿命比は約 0.7～1.4 となり、定常な変動荷重波形に対する材料のばらつきそのものはあまり大きくないことがわかる。したがって従来報告されている変動荷重下での累積損傷値のこれよりも大きなばらつきは、荷重波形が異なることによる寿命の中心値の変化によるものも含まれるためであると考えられる。

Fig. 14. Distribution of fatigue lives normalized by using standard log-normal distribution.

Fig. 15. Distribution of fatigue life ratios N_{2e}^* / N_{2e}^* .

Fig. 16. Distribution of normalized fatigue life ratios.

なお、さらに寿命のばらつきを詳細にみれば、Fig. 10に示したように、寿命が長くなるにしたがって若干標準偏差が増加している。したがって第3の方法としては、Fig. 15の結果をさらに寿命の対数平均値で除し、基準化する方法で、その結果をFig. 16に示す。寿命範囲があまり広くないので、Fig. 15の結果との相違はそれほどではないが、両裾野での対数正規分布へのあてはめは若干良くなっている。

5 結 言

中炭素鋼 S35C 焼準材を用い、一定振幅ならびに2段繰返し変動荷重による引張圧縮疲労試験を行い、疲労寿命の確率特性を検討した。2段繰返し変動荷重としては、高低両応力のひん度比 $n_1/n_2=1/160$ を基本とし、その応力条件を変えた4条件、ならびにひん度比の値は同じであるが1ブロック内の繰返し数を $n_1/n_2=32/5120$ とし、荷重変動周期を変えたもの、およびひん度比は $1/160$ であるが低レベル応力に引張りの平均応力を負荷したもの等計6条件を選び各条件につき10本ずつの試験を行った。また試験に際しては、応力とともに繰返し塑性ひずみを連続して計測し、応力-寿命関係の確率特性を、応力-塑性ひずみ関係と塑性ひずみ-寿命関係に分けて調べ、次の結果を得た。

(1) 疲労寿命の分布は、一定応力振幅試験の結果のみならず、耐久限度以下の領域を含む2段変動荷重試験の場合でも、破壊確率10~90%の範囲ではほぼ対数正規分布で表し得る。

(2) 一定応力振幅試験の結果は、耐久限度近傍の応力レベルで大きくばらつくが、変動荷重試験では、応力-塑性ひずみ関係、塑性ひずみ-寿命関係ともその領域で特にばらつきが大きくなることはなく、耐久限度近傍からそれ以下の領域にわたってほぼ同程度のばらつきを示す。詳細にみると寿命が長くなるにつれてばらつきは若干増加する。

(3) 荷重変動の周期や、平均応力の影響は、寿命の

中心値には大きく影響するが、寿命の中心値に対するばらつきの大きさにはあまり大きな影響を与えない。

(4) 応力-塑性ひずみ関係、塑性ひずみ-寿命関係は独立であり、本材料の場合、一定な定常変動応力に対しては、前者のばらつきは、後者のばらつきに比べて相当小さい。したがってこの場合、応力-寿命関係のばらつきは、ほぼ後者の塑性ひずみ-寿命関係のばらつきにより決まっていると考えられる。

(5) 若干厳密性は欠くが、得られているデータを二、三の方法で基準化しプールした結果、塑性ひずみレンジペアに対する変動荷重下の疲労寿命は、破壊確率のかなり広い範囲にわたって対数正規分布に従うと考えてよいことがわかった。

本研究には、文部省科学研究費の援助を受けた。また実験に当っては当時本学学生であった玉井浩邦、安宅豊両君の協力を得た。記して謝意を表す。

(昭和55年3月18日 日本機械学会関西支部第55期定時総会にて講演)

参 考 文 献

- 1) たとえば、西島 敏, 日本機械学会講演論文集 790-9, 61 (1979).
- 2) Schijve, J, Full Scale Fatigue Testing of Aircraft Structures, 41 (1961) Pergamon Press.
- 3) Jacoby, G, H., and H. Nowack, ASTM STP 511, 61 (1972).
- 4) 中川隆夫, 中林芳博, 材料, **28**, 9 (1979).
- 5) 菊川 真, 大路清嗣, 城野政弘, 溝口孝遠, 日本機械学会論文集, **35**, 2020 (1969).
- 6) 菊川 真, 城野政弘, 柴 智浩, 材料, **21**, 753 (1972).
- 7) 菊川 真, 城野政弘, 宋 智浩, 材料, **23**, 743 (1974).
- 8) 田中道七, 藤井 勉, 材料, **25**, 909 (1976).
- 9) 山田敏郎, 曾我美晋, 川村大助, 材料, **28**, 20 (1979).
- 10) 菊川 真, 城野政弘, 村田洋一, 材料, **29**, 998 (1980).
- 11) たとえば、中村 宏, 田中真一著, 機械の疲れ寿命算出法, p. 76 (1972) 養賢堂