疲労限度以下の累積疲労損傷に及ぼす過大過小応力頻度比の影響[†] (主として過小応力が引張平均応力を有する場合)

城 野 政 弘* 花 井 正 博** 菊 川 真***

Effect of Frequency Ratio of Overstress to Understress on Cumulative Damage below Fatigue Limit (When Low Level Stress has Tensile Mean Stress)

by

Masahiro JONO

(Department of Mechanical Engineering, Osaka University, Suita)

Masahiro HANAI

(Mitsubishi Electric Co., Amagasaki)

and Makoto KIKUKAWA

(Fukui Institute of Technology, Fukui)

Repeated two-step tests which composed of a large number of cycles of understress with or without tensile mean stress and the intermittent overstress were carried out on smooth specimens of a 0.38% carbon steel. The effects of frequency ratio of overstress to understress in one block on the cyclic plastic strain and the fatigue damage by the stress below fatigue limit were investigated. The main results obtained are as follows;

(1) The frequency ratio of overstress to understress affected the cyclic plastic strain, and the smaller ratio caused the larger plastic strain range-pair corresponding to the high level stress and the smaller plastic strain range-pair to the low level stress.

(2) The effect of frequency ratio of overstress to understress was found not only in the relationship between the plastic strain range-pair and the fatigue life but also in that between the stress and the fatigue life. It was concluded that the effect of frequency ratio on fatigue life could not be explained only by considering the variation of the plastic strain range-pair due to stress interaction.

(3) Although the fatigue damage amount per one cycle of low level stress did not change largely when the number of low level stress cycles, n_2 , was less than about 10^2 cycles, the larger n_2 decreased the damage amount. And the fatigue damage during one block of low level stress cycling became saturated at a certain number of cycles of n_2 and the damage could not accumulate any more beyond it.

(4) In the multi-step loadings the saturation of fatigue damage during understressing was sometimes disturbed and the fatigue life prediction based on the results of repeated two-step tests where the saturation of damage existed might be dangerous.

(Received July 30, 1982)

キー・ワード：累積疲労損傷，過大過小応力，応力頻度比，引張平均応力，繰返し塑性ひずみ

1 緒 言

実働荷重下では疲労限度以下の応力（過小応力）によっても、それが疲労限度以上の応力（過大応力）と組合された場合、疲労損傷が累積することは既によく

知られており、実験的あるいは実用的な見地からこのような疲労限度以下の応力による損傷を評価する方法が数多く提案されているが、なお不明な点が多い。

筆者らはこれまでに実働荷重下の疲労寿命の問題を応力-塑性ひずみの関係と、繰返し塑性ひずみ-寿命の関係に分けて研究し、疲労寿命を直接支配する因子は繰返し塑性ひずみであり、両振りともみせる変動荷重下では塑性ひずみレンジペアに関する線形累積損傷則

[†] 原稿受理 昭和57年7月30日

* 正 会 員 大阪大学工学部 吹田市山田丘

** 三菱電機(株)伊丹製作所 尼崎市

*** 正 会 員 福井工業大学 福井市学園

が疲労限度以下の低応力レベルをも含む極めて広い寿命範囲で成立つことを報告した。^{2)~4)}

しかしながら實際上このような低レベル応力の疲労損傷が問題となるのは、航空機翼やタービンブレードなどのように揚力や遠心力が平均応力として作用し、その上に突風や振動に伴う微小応力が重畳する場合が多い。したがってこのような観点から前報では、疲労限度以下の低レベル応力に引張りあるいは圧縮の平均応力が重畳する2段繰返し変動応力試験により、疲労限度以下の応力による疲労損傷に及ぼす平均応力の影響を検討し、塑性ひずみ-寿命関係においても引張りの平均応力は寿命を低下させ、しかもその効果は比較的低い平均応力の場合に顕著であることを報告した。⁵⁾

前報の結果は、疲労限度以上の応力と疲労限度以下の応力の頻度比は1:98に固定した場合のみであったので、本報ではこの頻度比を広い範囲に変えた2段繰返し変動応力試験を行い、応力頻度比が繰返し塑性ひずみ挙動ならびに疲労寿命に及ぼす影響を調べることにした。またより実働荷重に近い4~5段繰返し変動試験をも行い、若干の検討を加えたので報告する。

2 供試材料, 試験片および試験方法

供試材料は、JIS 規格 S 35 C に相当する炭素鋼の焼ならし材で、一つのピレットから連続して圧延した直径 28 mm の丸棒を 880℃ で 1.2 時間保持後空冷したものである。その化学成分ならびに機械的性質を Table I および Table II に示す。試験片形状は Fig. 1 に示すもので、旋盤加工した後、円周方向の旋削傷がなくなるまで 0/4 エメリー紙で軸方向に磨いて仕上げた。

試験は電動形引張圧縮疲労試験機を用いて行ったが、疲労限度以下の応力を多く含む試験⁶⁾では時間が長くなることから、先に報告した試験機のロードセルなら

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

Material	C	Mn	Si	P	S	Cu	Ni	Cr
S 35 C	0.38	0.72	0.25	0.010	0.015	0.04	0.02	0.13

Table II. Mechanical properties of material used.

Material	Yield point (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Fracture ductility (%)
S 35 C	372	612	23.7	58.5	88.0

Fig. 1. Test specimen configuration.

Fig. 2. Illustration of specimen rig, load cell and extensometer.

びに試験片取付け部を改造し、固有振動数を高くし、繰返し速度 125 Hz で行った。Fig. 2 に改造した試験片取付け部、ロードセルおよび変位計の説明図を示す。ロードセルは図のように支持フレームと一体構造とした円盤部に抵抗箔ひずみゲージを貼付し荷重検出を行った。試験片変位の計測には図に示す容量ブリッジ形伸び計を用い、ロードセル上部の同じ形式の伸び計で計測される弾性伸びを引算して、塑性ひずみを検出している。試験片チャック部にはウッドメタルを用い取付け時に試験片に曲げモーメントが作用しないようにするとともに、2枚のばね板で水平方向の運動を拘束し動的にも曲げ応力がかからないようにした。

Fig. 3 に試験に用いた2段繰返し試験の荷重波形を示す。(a)は両振りの2段繰返し波形(TS)であり、(b)は低レベル応力に引張りの平均応力を加え引張側のピークを揃えた2段繰返し波形(TST)である。高レベル応力 σ_1 は疲労限度以上のおよそ 5×10^4 回の寿命に対応する応力(TS波形の場合は $\sigma_1 = 313.6$ MPa, TST波形の場合は後述のように引張平均応力による塑性ひずみレンジベアの増加を考慮して $\sigma_1 = 294$ MPa)とし、 σ_2 を疲労限度以下の数レベルに選んだ。1ブロック内の高レベル応力の繰返し数 n_1 は主として1とし、低レベル応力の繰返し数 n_2 を系統的に変えて繰返し塑性ひずみ、寿命に及ぼす応力頻度の影響を調べたが一部 n_1 の値を大きくした試験も行った。各波形はマイクロコンピュータ(アイ電子 ABC-24)で発生させ、また応力および塑性ひずみの計測は、ミ

Fig. 3. Loading patterns of repeated two-step tests.

ニコンピュータ (三菱電機 MELCOM 70/25) で行った。計測の1サンプリング単位は変動荷重の1ブロックとし、それを10回重ね合わせることににより、測定信号に重畳するランダムノイズの低減を図っている。

3 試験結果

3.1 応力-寿命関係

Fig. 4 に一定応力振幅ならびに2段繰返し変動応力試験における応力-破断寿命の関係を示す。縦軸の $\Delta\sigma/2$, $\Delta r_p\sigma_2/2$ は一定応力振幅試験における応力振幅ならびに変動応力試験における低レベル応力のレンジペアの半分を示す。なお疲労限度以上の応力による損傷を評価するための基準とした一定応力振幅試験は、試験片の温度上昇を防ぐため繰返しの間に適宜無負荷休止期間を置く間欠負荷により行ったが、これは変動試験の場合には疲労限度以上の応力が多数回連続して負荷されることが少ないと考えられるためそれに対応させた試験を行ったものである。

Fig. 4. Relationship between stress range-pair and fatigue lives.

変動応力試験における疲労限度以下の応力による破断寿命は線形累積損傷則を仮定して次式より推定した。

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

ここに n_1 , n_2 はそれぞれ高, 低レベル応力の破断までの総繰返し数であり, $N_{1\sigma}$ は高レベル応力 σ_1 に対する破断繰返し数で上述の一定応力振幅試験結果から得られる破断繰返し数である。

図より, 引張平均応力を有する TST 波形の場合は, 同じ頻度比の点を直線で結び延長して考えると $\Delta r_p\sigma_2/2 = 215.6$ MPa に対し, それと同じ頻度比をもつ両振

りの TS 波形より寿命が短くなっており, 頻度比にかかわらず引張平均応力の影響があることがわかる。また両波形とも $n_1=1$ とした場合1ブロック内の低レベル応力の繰返し数 n_2 が大きくなるにつれて寿命が長くなり応力頻度比の疲労寿命への影響が認められる。 n_1/n_2 の比の値を一定 (1/100) にして, n_1 , n_2 を大きくしていった場合は, $n_1=1$ とした 1/100 の線よりは n_2 が大きくなるにつれて寿命が長くなるという傾向が認められ, 寿命には n_1/n_2 の比の値ではなく n_2 の数が影響していることがわかるが, 同じ n_2 に対する $n_1=1$ より短寿命となるようである。

以上のように応力-寿命関係に 応力頻度比が顕著に影響していることがわかったので, これが 応力-塑性ひずみ 関係ならびに 塑性ひずみ-寿命関係にどのように影響を及ぼしているかを次節以降で調べることにする。

3.2 繰返し塑性ひずみに及ぼす応力頻度比の影響

Fig. 5 は, 図中のヒステリシスの例で示すような, 高レベル応力負荷後の低レベル応力に対する塑性ひずみレンジペア $\Delta r_p\epsilon_{p2}$ の繰返しに伴う変化を示したものである。TS 波形については疲労試験途中で塑性ひずみの挙動がほぼ定常となった時点での1ブロック内の変化を示し, TST 波形については試験片間のばらつきをなくすため同一試験片を用い, 試験順序の影響がないことを確認したうえで頻度比を変えて塑性ひずみを測定したものである。図よりわかるように低レベル応力に重畳する平均応力の有無にかかわらず塑性ひずみレンジペア $\Delta r_p\epsilon_{p2}$ は繰返しにともない両対数紙上で直線的に減少する。また TST 波形においては頻度比が小さくなるほど, 高レベル応力負荷直後の $\Delta r_p\epsilon_{p2}$ が減少し, その後の減少を示す直線の傾きが緩やかにな

Fig. 5. Variation of plastic strain range-pair, $\Delta r_p\epsilon_{p2}$, in one block loading.

Fig. 6. Relationship between stress amplitude and plastic strain range-pair under repeated two-step test.

っていることがわかる。なお同図内に示した $\overline{\Delta r_p \varepsilon_{p2}}$ は、後述 Fig. 8 の塑性ひずみ-寿命関係の直線の傾き ($1/a$) を用いて $a(=2)$ 乗平均して求めた平均塑性ひずみレンジペアで、頻度比の減少による塑性ひずみレンジペアの減少の程度を示している。また TS および TST 波形における頻度比 $n_1/n_2=1/1000$ と $10/1000$ を比べると、 n_1 の大きい方が低レベル応力に対する塑性ひずみレンジペア $\Delta r_p \varepsilon_{p2i}$ は小さくなっていることがわかり、これより $\Delta r_p \varepsilon_{p2i}$ は低レベル応力の繰返し数 n_2 のみならず高レベル応力の繰返し数 n_1 によっても影響を受けることがわかる。Fig. 6 は寿命試験から得られた応力-塑性ひずみ関係を示す。横軸の塑性ひずみレンジペアは、次式に示す全寿命に対する a 乗平均値で計算した等価塑性ひずみレンジペア $\Delta r_p \tilde{\varepsilon}_{p2}$ を示している。

$$\Delta r_p \tilde{\varepsilon}_{p2} = \left\{ \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} (\Delta r_p \varepsilon_{p2i})^a \right\}^{1/a} \quad (2)$$

図中の実線は平均的な関係を示すものであり、2段繰返し試験では応力-塑性ひずみ関係は応力の低下とともに下側に折れ曲る。応力頻度比の影響は、低応力のレベルによらず Fig. 5 でみられたと同様に頻度比が小さくなるほど $\Delta r_p \tilde{\varepsilon}_{p2}$ が小さくなる傾向があるようであるが、必ずしも頻度比と対応しない場合もみうけられ、試験片間のばらつきが、頻度比の影響以上に大きくなる場合もあることを示している。

Fig. 7 は、同一試験片で頻度比を変えた TST 波形における高レベル応力に対する塑性ひずみレンジペア $\Delta r_p \varepsilon_{p1}$ と σ_2 の関係を示す。図より低レベル応力が 156.8 MPa 以下の範囲では低レベル応力が小さいほど $\Delta r_p \varepsilon_{p1}$ が大きくなる傾向がみられる。これは TST 波形においては低レベル応力に付加された引張平均応力により低レベル応力の繰返しの間にヒステリシスループが Fig. 5 に示したように一方向に移動していく一種の疲労変形が生ずるため $\Delta r_p \varepsilon_{p1}$ が大きくなるが、 σ_2 が小さいほど引張りの平均応力が高くなるため $\Delta r_p \varepsilon_{p1}$

Fig. 7. Effect of low level stress on high level plastic strain range-pair, $\Delta r_p \varepsilon_{p1}$.

が大きくなったものと考えられる。また $\sigma_2=78.4, 117.6 \text{ MPa}$ では、頻度比が小さく n_2 の繰返しが大きいほど $\Delta r_p \varepsilon_{p1}$ は増加しているが、 σ_2 が 156.8 MPa では一部逆転し、また σ_2 がそれ以上では、応力レベル、頻度比の系統的な効果は認められないようである。

3・3 塑性ひずみ-寿命の関係

前節でみたように応力の頻度比は高、低両レベル応力に対する塑性ひずみに影響を与えるので、次にこれらの塑性ひずみの大きさの変化を考慮したうえで、塑性ひずみ-寿命の関係を調べた。Fig. 8 にその結果を示す。縦軸は低レベル応力に対する等価塑性ひずみレンジペア $\Delta r_p \tilde{\varepsilon}_{p2}$ であり、横軸には、塑性ひずみに関する線形累積損傷則を仮定して、次式で推定した破断寿命をとった。

$$N_{2e}^* = n_2 / (1 - n_1 / N_{1e}) \quad (3)$$

ここに N_{1e} は一定振幅試験で求めた $\Delta \tilde{\varepsilon}_p - N$ 曲線上で、高レベル等価塑性ひずみレンジペア $\Delta r_p \tilde{\varepsilon}_{p1}$ に対応する破断繰返し数である。

図より、塑性ひずみ-寿命関係においても頻度比による影響が明らかに認められ、頻度比が小さくなるにつれて、 $\Delta r_p \tilde{\varepsilon}_{p2}$ に対応する寿命が長くなることがわか

Fig. 8. Relationship between plastic strain range-pair and number of cycles to failure.

る。また n_1 が 1 より大きい場合、頻度比の値が同じでも n_2 の繰返し数が大きくなるにつれて寿命が長くなるなど、応力-寿命関係で見られたのと同様の傾向を示している。

したがって頻度比の疲労寿命に及ぼす影響を、応力-塑性ひずみ関係と塑性ひずみ-寿命関係に分けて考えた場合、頻度比の影響は応力-塑性ひずみ関係においては、頻度比が小さくなるほど低レベル応力に対する塑性ひずみが小さくなる傾向を示すが試験片間のばらつきがこれを上まわる場合があること、ならびに頻度比による高レベル応力に対する塑性ひずみレンジピーの増加を考慮しても塑性ひずみ-寿命関係において頻度比の影響が顕著にあらわれ、頻度比が小さくなるにつれて、寿命が長くなっていくことから、頻度比の影響を塑性ひずみの変化のみで説明することはできないということがわかる。

3・4 疲労限度以下の応力による損傷に及ぼす頻度比の影響

本節では、これまでに得られた 2 段繰返し試験結果から、塑性ひずみ-寿命関係において見られた低レベル応力による疲労損傷に及ぼす頻度比の影響について定量的な検討を加えることを試みる。

疲労限度以下の応力 σ_2 1 サイクル当りの疲労損傷を、その応力に対する塑性ひずみレンジピー $\Delta r_p \tilde{\epsilon}_{p2}$ に対する寿命 N_{2e}^* の逆数 $1/N_{2e}^*$ で考えることとし、これを縦軸に、横軸に 1 ブロック中の低レベル応力の繰返し数 n_2 をとって Fig. 9 に示す。

図中の実線は $n_1=1$ の場合の結果を各応力レベルごとに結んだもので、いずれも右下がりの曲線となり、 n_2 が大きくなるにつれて σ_2 1 サイクル当りの疲労損傷が減少していることがわかる。このような n_2 の増加による疲労損傷の減少を塑性ひずみの減少により説明しようとする試みも両振り試験では報告されている⁸⁾。

Fig. 9. Effect of n_2 on fatigue damage due to one cycle of low level stress.

本実験の TST 波形で、 $\sigma_2=196$ MPa, $n_1/n_2=1/100$ を基準として、 n_2 の増加による塑性ひずみの減少により損傷の減少を計算すると図中の 2 点鎖線となる。実験結果はこれよりも減少が大きく、この図からも、引張平均応力が重畳している場合には頻度比の影響は、塑性ひずみの変化のみでは説明できないことがわかる。この傾向をさらに詳細にみると、 n_2 の小さい領域 ($\sim 10^2$ 以下) では曲線が緩かに下がり、頻度比による影響は比較的小さいが、 n_2 がこれより大きくなると、曲線の下がり方が急になり、頻度比による影響が顕著にあらわれてくる。さらに n_2 が大きくなると、各応力レベルで異なるある n_2 の値から曲線は -1 の傾きをもつ直線になる。このことは、この n_2 の値以上の σ_2 の繰返しは損傷を与えず、1 ブロック内の σ_2 の繰返しによって累積する損傷に限界があり、 σ_2 による損傷が飽和することを意味している。図より、このような損傷の飽和は、低レベル応力が小さいほど、少ない繰返し数でおこる傾向が見られる。上述の σ_2 によって累積する 1 ブロック当りの損傷の限界値 (n_2/N_{2e}^*) を各応力レベルについて各曲線の右下に示し、また高レベル応力による損傷値 $1/N_1$ との比も示している。

つぎに平均応力が 0 の TS 波形の場合について見ると σ_2 1 サイクル当りの損傷は TST 波形の場合にくらべて小さくなっている。例えば、TS 波形で $\sigma_2=215.6$ MPa の損傷値が、TST 波形の $\sigma_2=117.6$ MPa の損傷値とほぼ等しくなり、これより引張平均応力が σ_2 の疲労損傷を増大させていることがわかる。

また、 n_2 の増加にともなう損傷の減少の傾向は引張平均応力をもつ場合とほぼ同様であるが、 $\sigma_2=215.6$ MPa で n_2 が 4×10^3 になると損傷は -1 の傾きをもつ直線から下方に離れ、1 ブロック中の低レベル応力の繰返し数、あるところから強化作用をもつように見える。

一方、 n_1/n_2 の比の値を一定 ($1/100$) にして、 n_1 , n_2 を増加させた場合についてみると、破線で示した TST 波形、一点鎖線で示した TS 波形とも、 σ_2 1 サイクル当りの損傷は n_2 の増加とともに両対数紙上で直線的に減少するが、試験した範囲では、傾き -1 ままで低下することではなく、損傷の飽和が妨げられていることがわかる。

以上の結果から、2 段繰返し応力試験では、低レベル応力による疲労損傷は、高レベル応力の繰返し数 n_1 が極めて少ない場合には低レベル応力の繰返し数の増加による損傷の飽和がみられるが、 n_1 が多くなると損傷の飽和が妨げられること、ならびにこの傾向は低レベル応力に重畳する引張平均応力の有無には関係なく認められるが、1 サイクル当りの損傷の大きさは平均応力により異なることがわかる。

Fig. 10. Loading pattern of repeated four-step test.

3・5 多段繰返し応力試験結果

つぎに, 3・1~3・4節で述べた2段繰返し変動試験より, 実働荷重により近い4~5段繰返し変動試験を行い, 疲労限度以下の応力による疲労損傷に及ぼす応力頻度比の影響を調べるとともに, 2段繰返し試験における疲労損傷との関連を検討した. Fig. 10に本研究で用いた4段繰返し荷重波形を示す.

これは各レベル応力の引張側のピーク応力をそろえ, 最低レベル応力を除く各レベルの応力が孤立して負荷される最も疲労損傷の大きいと思われる荷重パターンである. 5段繰返し荷重波形は, σ_4 の間にさらに低い応力 σ_5 を引張側のピーク応力をそろえて入れたものである. 試験条件は Table III および Fig. 11 に示すように最大応力 σ_1 の1ブロック中の頻度を1に固定

Table III. Test conditions of repeated four- and five-step tests.

	4-step test					5-step test	
	A	B	C	D	E	F	G
σ_1	289.1	292.0	291.1	294.0	294.0	294.0	294.0
σ_2	195.0	195.0	196.0	198.9	197.0	198.0	198.0
σ_3	155.8	155.8	157.8	158.8	158.8	157.8	157.8
σ_4	117.6	117.6	118.6	120.0	120.0	117.6	118.6
σ_5	—	—	—	—	—	78.4	79.4
n_1	1						
n_2	27	50	80	110	155	27	50
n_3	112	204	405	666	1092	112	204
n_4	420	1020	2430	4662	8736	420	1020
n_5	—	—	—	—	—	1680	5100

Unit of σ : MPa

Fig. 11. Distribution of stress frequency of repeated four- and five-step tests.

Fig. 12. Modified S-N curves to four- and five-step tests.

し, 疲労限度以下の応力 $\sigma_2 \sim \sigma_5$ の頻度を実機の長期分布としてよく現れる指数分布となるようにし, その傾きを4種類に選んだ.

試験結果を修正 S-N 曲線の形で表し, Fig. 12 に示す. 修正 S-N 曲線は一定振幅試験で得られた S-N 曲線上で, 最大応力 σ_1 に対応する点を通る直線であると仮定し, 累積繰返し数比 $\sum_{i=1}^{4,5} (n_i/N_i)$ が1となるような傾きをもつように推定したものである. 図より応力頻度分布曲線が傾きを減じて疲労限度以下の応力を多く含むようになるなど修正 S-N 曲線が長寿命側へ傾いていくことがわかる. しかしながら, 4段繰返し試験で, C, D, E のような頻度比になると, おおのこの修正 S-N 曲線が接近し, この範囲内の頻度比の違いは修正 S-N 曲線に対してほとんど影響を及ぼさないようである.

また A, B の応力頻度分布をもつ4段繰返し試験にさらに低い応力 σ_5 を加えた5段繰返し試験 F, G の場合の修正 S-N 曲線は, $n_1 \sim n_4$ が等しい4段繰返し試験に対する修正 S-N 曲線 A, B よりも長寿命側になる. これは F, G において数多く含まれる σ_5 のために疲労限度以下の各レベル応力の損傷が飽和してくるためだろうと考えられる.

つぎにこの4~5段繰返し応力試験の寿命を, 2段繰返し応力による疲労試験結果から推定することを試みた. 寿命の推定には, Fig. 9 を用い1ブロック中の疲労限度以下の各応力の繰返し数 n_i ($i=2 \sim 4$ または5) に対し, その応力に対応する曲線から損傷値を求め, これらの総和に最大応力 σ_1 による損傷値(一定振幅試験結果より求めた)を加えたものを1ブロックの損傷値とし, これの逆数をとって推定破断ブロック数とした.

実破断ブロック数と推定破断ブロック数の比を縦

Fig. 13. Comparison of fatigue lives with estimated ones from two-step test results.

軸にとり、横軸に疲労限度以上の応力の頻度比 $a = n_1 / \sum_{i=1}^{4,5} n_i$ をとって Fig. 13 に示す。4 段繰返し試験の場合、 a が 3×10^{-4} 以上で、各応力レベルでの 2 段繰返し試験で損傷の飽和が著しくない場合は、寿命比は 1～1.3 でほぼ妥当な推定を与えている。しかしながら a が 2×10^{-4} 以下となると損傷の飽和が存在する 2 段試験から推定した寿命比は 1 より小さくなり危険側の推定を与えていることがわかる。このことは多段繰返し変動試験の場合には各レベル応力の相互作用が存在し、損傷の飽和が抑制されることがあることを示している。5 段試験の場合は、最低レベル応力の多数回の繰返しによる損傷の飽和が存在するためこの場合の推定は安全側の推定となっている。

4 結 言

本研究では、炭素鋼 S35C 焼ならし材を用い、疲労限度以下の繰返し応力に小頻度の疲労限度以上の応力が加わる、両振りならびに疲労限度以下の応力に引張平均応力を付加した 2 段繰返し変動試験を行い、累積疲労損傷に及ぼす高低レベル応力の頻度比の影響を、応力-繰返し塑性ひずみ関係と、繰返し塑性ひずみ-寿命関係に分けて調べた。さらに実働荷重により近い 4～5 段繰返し変動応力試験を行い疲労寿命に及ぼす応力頻度分布の影響について検討を加え、以下の結果を得た。

(1) 2 段繰返し応力の 1 ブロック内で、低レベル応力に対する塑性ひずみレンジペアは応力の繰返しとともに両対数紙上で直線的に減少する。この塑性ひずみレンジペアの平均値は高低レベル応力の頻度比が小さいほど小さくなるが、試験片間のばらつきが頻度比の影響より大きくなる場合もある。

(2) 高レベル応力に対する塑性ひずみレンジペアは、

低レベル応力に平均応力が付加された場合その影響を受け、頻度比が小さく、低レベル応力が小さいほど、すなわち平均応力の高い小振幅応力が多く繰返されるほど大きくなる。

(3) 応力-寿命関係のみでなく、塑性ひずみ-寿命関係においても応力頻度比の影響がみられ、上記の塑性ひずみの変化のみでは疲労寿命に及ぼす頻度比の影響は説明できない。

(4) 疲労寿命に及ぼす応力頻度比の影響は、低レベル応力の繰返し数 n_2 の小さい範囲では余り大きくないが、 n_2 が大きくなるにしたがい低レベル応力 1 サイクル当りの損傷が小さくなり寿命は長くなる。さらに n_2 が大きくなるとそれ以上の繰返しに対し疲労損傷が累積しなくなるようで、損傷の飽和がみられる。この損傷が飽和する繰返し数は低レベル応力により異なり、応力レベルが低いほど小さい繰返し数で飽和が現れる。

(5) 多段繰返し変動応力試験においても応力頻度比の影響が存在し、疲労限度以下の応力を多く含むにつれ寿命が長くなる傾向がある。しかしながら疲労限度以下で比較的高い応力が頻繁に変動する場合には損傷の飽和が抑制されることがあり、損傷の飽和が存在する 2 段繰返し試験結果により多段繰返し応力下の疲労寿命を推定すると危険側の推定となる場合がある。

終りに本研究には文部省科学研究費の援助を受けた。また実験の遂行に当っては、当時大阪大学工学部学生岡部雅彦、内田秀史両君の協力を得た。ここに記し謝意を表する。

(昭和 57 年 3 月 17 日 日本機械学会関西支部第 57 期定時総会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 例えば、中村 宏、田中真一、“機械の疲れ寿命算出法” (1972) 養賢堂
- 2) 菊川 真、城野政弘、宋 智浩、材料、**21**, 753 (1972).
- 3) 菊川 真、城野政弘、宋 智浩、材料、**23**, 743 (1974).
- 4) 菊川 真、日本機械学会誌、**95**, 1485 (1972).
- 5) 菊川 真、城野政弘、村田洋一、材料、**29**, 998 (1980).
- 6) 菊川 真、大路清嗣、城野政弘、材料、**17**, 135 (1968).
- 7) 菊川 真、城野政弘、田中健一、近藤良之、田畑文夫、村田洋一、材料、**29**, 1240 (1980).
- 8) 中村 宏、恒成利康、堀川 武、井手龍一郎、日本機械学会論文集、**A-47**, 461 (1981).
- 9) 例えば、E. Gassner and W. Lipp, ASTM STP 671, 222 (1979).