変動荷重下での内部応力・有効応力の 過渡挙動と疲労損傷の評価†

松 田 勝* 衣 川 貴 志** 猪 飼 靖***

Transient Behaviours of Internal and Effective Stresses and Estimation of Fatigue Damage under Two-step Loading Conditions

by

Masaru MATSUDA*, Takashi KINUGAWA** and Yasushi IKAI***

The purpose of this study was to estimate the influence of amplitude fluctuation on fatigue damage. For this purpose, a new method to measure internal and effective stresses only from the stress-strain hysteresis data was developed. By using this method, the transient behaviours of total strain, plastic strain width and effective stress were observed during two-step stress cycling tests.

Using a new cumulative damage criterion named ES-Miner's rule, fatigue damages under multiple repeated stresses in two levels were calculated and compared with those obtained by Miner's rule. The fatigue damage caused by stress amplitude fluctuations was evaluated on the viewpoint of internal stress and effective stress.

The results obtained are as follows:

1. The influences of stress amplitude fluctuation on plastic strain width and effective stress leasted up to 1000 cycles.
2. The stress amplitude fluctuation, regardless of its direction, gave a transient damage greater than that under a constant stress amplitude.

Key words: Internal stress, Effective stress, Cumulative damage, Transient behaviours, ES-Miner's rule

1 緒 言

現在の疲労現象の研究においてなお不明瞭な点の一つに実働荷重下における実際の疲労破断繰返し数と損傷値計算による予想破断繰返し数がしばしば一致しないことが挙げられる。このことについて中村らは詳細な検討を行ない、全負荷の大部分が過小応力振幅であり間欠的に過大応力が負荷される場合に特に大きな違いを生じることを報告している。また田中ら²⁾三沢ら³⁾によって荷重パターンと破断繰返し数の関係について報告がなされている。さらには過小応力のみによる材料破壊も報告されている⁴⁾。

以上の報告を要約すると、実働荷重下の疲労では

- ・過小応力であっても、直前の負荷いかんによっては材料に損傷を与え得る。
- ・過大応力であっても、直前の負荷いかんによっては材料に思ったほどの損傷を与えない。

の2つの振舞いがあり、これらが実働荷重下の寿命予測を困難にしていると考えられる。

この問題を解決するため、修正係数を用いたり S

- N 曲線に補正を加えたりする事によって、疲労損傷評価が試みられてきている。これらの報告ではそれぞれの事例についてよい結果を与えているが、異なった条件には適用できず、また疲労損傷そのものの意味が未解明であるという問題はそのまま残っている。これらに対して著者らは、負荷全てがそのまま材料に疲労損傷を与えるのではなく、実際の疲労損傷は負荷の一部分によって生じるとの立場に立ち、疲労の問題を取り扱ってきた⁴⁾⁻⁶⁾。

そこで高温変形の記述などに用いられてきた内部応力・有効応力の考え方に著者らは着目し、鋼の高サイクル引張圧縮疲労における内部応力・有効応力を測定した。そしてこれまでに、内部応力・有効応力の考え方の有用性および疲労限度 σ_w の解釈法についての報告⁵⁾や、有効応力をもとにした疲労損傷評価法である ES マイナー則の提案などを行うことができた。

本研究では、内部応力・有効応力の考え方を実働荷重下での疲労に適用することにした。そこでまず、応力変動前後の有効応力の挙動を測定することによって、

† 原稿受理 昭和63年12月26日 Received Dec. 26, 1988

* 学生会員 神戸大学大学院, 神戸市灘区六甲台町, Graduate Student, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe

** 神戸大学大学院, 神戸市灘区六甲台町, Graduate Student, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe

*** 正 会 員 神戸大学工学部, 神戸市灘区六甲台町, Faculty of Engineering, Kobe University, Rokkodai-cho, Nada-ku, Kobe

応力変動自体が材料損傷にどのような影響を与えているのかを調べ、材料の応力変動による疲労挙動について考察を行なうことにした。

1・1 内部応力・有効応力

吉永⁷⁾は、内部応力を転位が他の転位などの長距離応力場による非熱的障害を乗り越えるために必要な非熱活性化応力に、有効応力をパイエルス・ポテンシャルや点障害などによる熱的障害を乗り越えるための熱活性化応力に相当すると表現している。この考えを材料変形の取り扱いに適用すると、負荷応力すべてが材料に塑性変形を生じさせるのではなく、負荷応力から内部応力を差し引いた有効応力のみが塑性変形を生じさせているとの理解を得ることができる。内部応力・有効応力の考えを用いて転位挙動や塑性変形を取り扱う研究は、近年盛んに行われるようになってきている。

したがって疲労負荷と変形挙動や寿命・強度との関係を取り扱う際には、応力として負荷応力を用いるだけでは不十分で、内部応力を考慮した有効応力によって検討を加えることが有効であると考えられる。

2 供試材料および実験方法

2・1 供試材料

実験に用いた材料は、緩和ひずみの測定の容易さを考え耐久限度付近でも大きな塑性ひずみが生じる機械構造用炭素鋼 S35C である。これを 1123 K・3.6 ksec (850°C 1 h) 加熱後炉冷して、Fig. 1 に示す形状寸法に加工した。その化学成分を Table I に、機械的性質を Table II に示す。

2・2 実験方法

2・2・1 疲労試験 疲労試験に用いた試験装置は、電気油圧サーボ式引張圧縮疲労試験機（鷺宮製作所、

Fig. 1. Test specimen.

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

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Cu
0.34	0.24	0.76	0.03	0.03	0.04	0.13	0.09

Table II. Mechanical properties of the material.

Material	Yield point (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
S35C	273	490	31.0	41.0

Fig. 2. System of test equipment.

容量 49 kN) ならびにその制御のためのパーソナル・コンピュータ（日本電気、PC-8001mkII）およびインターフェイスとしての A/D-D/A コンバーターボードである。試験機の荷重制御、応力-ひずみヒステリシスループのデータ採取は、自作のソフトウェアによって全て自動的に行なわれた。測定システムを Fig. 2 に示す。

2・2・2 負荷応力変動下での応力-ひずみヒステリシスループの採取 応力振幅 σ_1 を繰返し数 $n_1=6000$ 回、応力振幅 σ_2 を繰返し数 $n_2=5000$ 回負荷する二段二重繰返し応力による疲労試験を行なった。負荷応力変動前後の応力-ひずみヒステリシスループのデータはリアルタイムで磁気ディスク内に採取された。

なお、試験片は耐久限度直下の応力振幅で 10^7 回あらかじめ負荷されたものを用いた。これにより本研究で行なうような 10^5 回程度の繰返し負荷の実験では、測定パラメータの変化が無視できる程度のもとなつて、純粋に荷重変動の影響のみが観察されるものと期待できる。

2・2・3 全ひずみ (ϵ_t)、塑性ひずみ幅 ($\Delta\epsilon_p$) および有効応力 (σ_{eff}) の解析 弾性域検出法を用いて、上記の実験で得られた応力-ひずみヒステリシスループより ϵ_t 、 $\Delta\epsilon_p$ および σ_{eff} の挙動を求めた。弾性域検出法は、応力-ひずみヒステリシスループの形状から、有効応力を測定するために新しく考案した手法である。応力-ひずみヒステリシスループを応力-塑性ひずみ

Fig. 3. Illustration of stress (σ_a and σ_1)-plastic strain ($\Delta\epsilon_p$) relation.

ヒステリシスループ (Fig. 3) に変換すると, 応力が変化しても変形は弾性変形のみで全く塑性変形を生じない領域 (AB 間, DE 間) が認められる. この領域を弾性域と呼ぶ. 弾性域検出法とは弾性域の端点である A, B, D および E を決定し, 次に点 D での応力の値を負荷応力 σ_a における内部応力 σ_i と近似して, そのときの有効応力 σ_{eff} を $\sigma_{\text{eff}} = \sigma_a - \sigma_i$ によって求める方法である. 本実験では, 8 回連続採取したデータを平滑化して得られた応力-ひずみヒステリシスループから σ_i ・ σ_{eff} を求めた.

3 実験結果

3.1 S-N 線図および疲労限度

両振引張圧縮疲労試験における S-N 線図を Fig. 4 に示す. その傾斜部の式は,

$$\sigma = -32.3 \cdot \log N + 395.82 \text{ (MPa)} \quad (1)$$

であり, また 6 本の試験片によるステアケース法を適用した疲労限度 σ_w の信頼区間 (信頼率 95 %) は

$$202.7 < \sigma_w < 217.3 \text{ (MPa)} \quad (2)$$

である. knee は $n = 5 \times 10^5$ cycle 付近で現われている.

3.2 負荷応力変動直後の塑性ひずみ幅 $\Delta \epsilon_p$ の挙動

Fig. 5 に二段二重応力振幅上昇試験 (以下「上昇試験」と呼ぶ) における ϵ_t , $\Delta \epsilon_p$ の挙動を示す. 一次応力 $\sigma_1 = 208 \text{ MPa}$, 二次応力 $\sigma_2 = 219 \text{ MPa}$ である. 一次応力では $\epsilon_t = 3.3 \times 10^{-3}$, $\Delta \epsilon_p = 1.1 \times 10^{-3}$ であったものが, 二次応力ではそれぞれ $\epsilon_t = 4.1 \times 10^{-3}$, $\Delta \epsilon_p = 1.7 \times 10^{-3}$ に収束した. このとき変動直後の $\Delta \epsilon_p$ は 1.4×10^{-3} (二次応力での収束値の 82 %) であった. また応力変動によるこれらの値の変化は, 1000 回程度の繰返し数で完了しているようである.

次に Fig. 6 に二段二重応力振幅下降試験 (以下「下降試験」と呼ぶ) における ϵ_t および $\Delta \epsilon_p$ の挙動を示す. $\sigma_1 = 226 \text{ MPa}$, $\sigma_2 = 213 \text{ MPa}$ である. 一次応力では $\epsilon_t = 4.6 \times 10^{-3}$, $\Delta \epsilon_p = 2.3 \times 10^{-3}$ であったものが, 二次応力では $\epsilon_t = 3.5 \times 10^{-3}$, $\Delta \epsilon_p = 1.2 \times 10^{-3}$ に収束した. $\Delta \epsilon_p$ は変動直後の $\Delta \epsilon_p$ は 1.5×10^{-3} (二次応力での収束値の 125 %) であった. また上昇試験の場合

Fig. 4. S-N curve.

Fig. 5. Change in total strain (ϵ_t) and plastic strain range ($\Delta \epsilon_p$) under two-step increasing test with $\sigma_1 = 208 \text{ MPa}$ and $\sigma_2 = 219 \text{ MPa}$.

と同様に, これらの値の過渡挙動は 1000 回程度の繰返し数で完了していることが測定された.

Fig. 7 は $n_1 = 5000$ 回と $n_2 = 5000$ 回における σ_a と ϵ_t との関係を同時に示したものである. データが十分にないために明確な線が引けない部分は点線を用いた. 同様に Fig. 8 に $n_1 = 5000$ 回と $n_2 = 5000$ 回における

Fig. 6. Change in total strain (ϵ_t) and plastic strain range ($\Delta \epsilon_p$) under two-step decreasing test with $\sigma_1 = 226 \text{ MPa}$ and $\sigma_2 = 210 \text{ MPa}$.

Fig. 7. Relationship between total strain (ϵ_t) and stress (σ_a) at $n = 5000$ cycles.

Fig. 8. Relationship between plastic strain range ($\Delta\epsilon_p$) and stress (σ_a) at $n=5000$ cycles.

σ_a と $\Delta\epsilon_p$ との関係を同時に示す。Fig. 7, Fig. 8 より安定したときの ϵ_t , $\Delta\epsilon_p$ の値はそのときの σ_a の値に依存しており、この時点で応力変動の影響は残っていないと考えられる。

これらのことから、二次応力を負荷した場合に一次応力 σ_1 の 6000 回の負荷による影響はせいぜい 1000 回までで、それ以降にはほとんど影響を与えないことがわかった。

3・3 応力変動後の σ_i , σ_{eff} の挙動

上昇試験における内部応力 σ_i および有効応力 σ_{eff} の挙動を Fig. 9 に示す。一次応力 $\sigma_1=208$ MPa, 二次応力 $\sigma_2=219$ MPa である。上昇直後の有効応力は $\sigma_{eff}=58.9$ MPa であり、収束時 ($\sigma_{eff}=49.1$ MPa) の 120 % である。また有効応力の過渡挙動は、約 500~800 回程度の繰返し数で完了していることが認められた。

次に下降試験における σ_i および σ_{eff} の挙動を Fig. 10 に示す。 $\sigma_i=226$ MPa, $\sigma_2=213$ MPa である。下降直後の有効応力は $\sigma_{eff}=39.2$ MPa であり、収束時 ($\sigma_{eff}=29.4$ MPa) の 133 % である。また有効応力の過渡挙動は、500 回程度の繰返し数で完了していることが認められた。

以上の結果から、有効応力は負荷応力の変動方向が

Fig. 9. Change in internal stress (σ_i) and effective stress (σ_{eff}) under two-step increasing test with $\sigma_1=208$ MPa and $\sigma_2=219$ MPa.

Fig. 10. Change in internal stress (σ_i) and effective stress (σ_{eff}) under two-step decreasing test with $\sigma_1=266$ MPa and $\sigma_2=210$ MPa.

上昇する場合も下降する場合も共に一次応力に対応した値から変動によって一時的に増加し、その後繰返し数と共に減少して $n_2=500\sim1000$ 回程度で二次応力に応じた値に落ちつくことがわかった。

3・4 ES マイナー則による二段多重重複繰返し疲労試験での損傷値計算

応力変動時の有効応力の過渡挙動をもとに応力変動によって材料が受ける疲労損傷の定量的な評価が可能

Table III. Results of fatigue test under multiple repeated stresses in two stress levels.

(The suffixes s and es denote stress and effective stress, respectively.).

No	Stress		Block size		N_f	Cumulative damage value			
	σ_1 MPa	σ_2 MPa	n'_1	n'_2		Miner's rule		ES-Miner's rule	
						n_1/N_1	n_2/N_2	$\Sigma(n_i/N_i)_s$	$\Sigma(n_i/N_i)_{es}$
1	206	98	200	9800	unbroken	>3.894	0	>3.894	0.266
2	206	181	200	9800	unbroken	>4.178	0	>4.178	0.030
3	206	157	200	9800	unbroken	>3.041	0	>3.041	0.214
4	206	—	—	—	$1.102 \cdot 10^7$	10.630	—	10.630	0.719
5	206	191	200	800	$6.518 \cdot 10^5$	1.840	0.746	2.586	0.780
6	206	191	500	500	$6.631 \cdot 10^5$	4.676	0.474	5.512	0.538

Table IV. Damage estimation for cycling tests under two-step increasing stress.

$\sigma_a(\text{MPa})$		$\sigma_{\text{eff}}(\text{MPa})$		D_a ($\times 10^{-5}$)	D_b ($\times 10^{-5}$)	D_b/D_a
σ_1	σ_2	$n_2=10$	$n_2=1000$			
199	216	53.0	45.1	0.63	1.20	1.90
198	222	58.9	49.1	1.56	3.66	2.35
208	219	58.9	51.0	2.40	4.56	1.90
207	226	62.8	49.1	1.56	6.12	3.92

となる。そこで有効応力に着目した疲労損傷則である ES マイナー則を用いて損傷値の計算を行なった。ES マイナー則は、有効応力一定試験によって求められた有効応力と破断繰返し数との関係を表わす ES-N 曲線を用いて、マイナー則の手続きと同様に損傷値を計算する方法⁶⁾である。

Table III に二段多重繰返し疲労試験における ES マイナー則による累積損傷値 $\Sigma(n_i/N_i)_{es}$ とマイナー則による累積損傷値 $\Sigma(n_i/N_i)_s$ との比較を示す。 σ_1 は 1 次応力振幅、 σ_2 は 2 次応力振幅で、 n_1' 、 n_2' は 1 プログラム周期におけるそれぞれの応力振幅での繰返し数、また $n_1 = \Sigma n_1'$ 、 $n_2 = \Sigma n_2'$ である。非破断の場合の試験打ち切り繰返し数は 1×10^7 であり、また No. 4 は No. 3 で非破断であった試験片に引き続いて一定応力 ($\sigma_a = 206 \text{ MPa}$) を負荷したものである。ここで用いた試験片の疲労限度 σ_w は $\sigma_w = 187 \text{ MPa}$ である。

また Table IV に一定負荷応力 σ_2 が 1000 回負荷されたとしたときの ES マイナー値 D_a 、一次応力 σ_1 から二次応力 σ_2 へ変動した直後の 1000 回までの ES マイナー値 D_b および D_b/D_a を変動直後 ($n_2=10$) と $n_2=1000$ での有効応力と共に示す。

4 考 察

4.1 応力変動による内部応力の挙動

上昇試験・下降試験ともに、負荷応力変動直後から 1000 回程度の繰返し数の間に、 $\Delta \varepsilon_p$ および σ_{eff} に過渡挙動が観察された。また疲労負荷を受ける炭素鋼では、その負荷に対応したある特別な転位構造をとるとの報告や、過大応力が負荷されることでそれまで安定していた転位構造が乱されるとの報告がある¹⁰⁾。したがって、この過渡挙動は材料内部の転位構造変化と密接な関係があるものと考えられる。本節では、この転位構造変化をうながす機構について若干の考察を加えることにする。

竹内の考え¹²⁾によると、「材料にある変形が与えられている場合、可動転位密度はその変形速度を保つのに必要な負荷応力が最小となるように決まる」とされる。いま、安定な応力-ひずみ状態にある材料の変形様式が別の変形様式に変化したとき、応力-ひずみ状態がどう変化するかを考える。もし内部に何の変化もなく全体の変形挙動がまかなわれるとするならば、有効応

力の変動のみによって全体の変形が記述されなければならない。しかしながら、上述の考えにより、可動転位密度は有効応力の変動を抑制する方向に変化をするはずである。このことは総転位密度中の可動転位密度の割合が変化することを意味し、したがって、可動転位密度の変化分に相当する転位をまかなうために、応力変動によって転位構造が再構築される必要が生じる。

これらのことから、以下の考え方が導出できよう。

1. 材料が疲労負荷を受けると転位密度に変化を生じるが、内部応力・有効応力の値は、その転位密度とわりわけ可動転位密度に依存して、ある安定な値に収束しようとする。

2. 1. の約束にしたがって、材料内では転位構造の配列変化が起こる。

これらの考え方は、著者らが従来より主張していた、「疲労進行にともなう内部応力の変化」の記述の拡張・一般化にほかならない。また、本研究で取り扱う応力変動による内部応力の変化は、観点を換えると不可逆変化であり、この過渡挙動による疲労損傷に対する損傷評価が必要であろう。

4.2 応力変動に伴う疲労損傷とその評価

4.2.1 応力変動と疲労損傷との関係 Table IV より応力振幅が上昇する場合の D_b/D_a は 2~3 前後となっている。また負荷応力が下降するときも同様の結果である。したがって、応力変動自体が材料に一時的に過大な損傷を与えていると推察できる。したがって、変動荷重を受ける材料の疲労損傷評価をする際には、従来の繰返し負荷が作用することによる損傷に加えて、「応力変動自体による損傷」と「繰返し負荷による強化」を考慮にいれる必要があると考えられる。

4.2.2 ES マイナー則とマイナー則の比較 Table III において二段多重繰返し応力によって破断した例 (No. 4~6) を見ると、マイナー値が 10.630, 2.586 および 5.152 であるのに対して、ES マイナー値はそれぞれ 0.719, 0.780 および 0.538 となって、後者の方がはるかに 1 に近い値を得ている。一方、破断していない例 (No. 1~3) でもマイナー値は同様に 1 よりかなり大きな値であるのに対して、ES マイナー値は 0.030~0.266 と小さく、疲労損傷が小さいことをうまく表現してきている。既報⁶⁾にて述べた通り、有効応力に着目して損傷評価をすることは、「応力変動によるものを含めた疲労損傷」と「繰返し負荷による強化」の両者を自動的に評価することになって、従来より用いられてきたマイナー則では評価が困難であった変動応力下での疲労損傷をうまく表現できるものと言えよう。

4.2.3 ES マイナー則と塑性ひずみ整理による損傷値計算との関係 本研究で提案している ES マ

イナー則のように実働荷重下での損傷を一元的に評価しているものとして、菊川らの相当塑性ひずみレンジ¹³⁾による整理がある。ここでは、この菊川らによる成果と本研究の知見とを比較し、類似点、相違点および問題点について言及する。

有効応力は材料に塑性変形を発生させる応力である。したがって、菊川らの整理に用いられた相当塑性ひずみは、本研究で提案している有効応力によって生じたものと言える。つまり、疲労損傷をその結果を用いて整理したものが菊川らの取り扱いであり、一方その発生源を用いて整理したものが本研究であることができる。このことから、菊川らの相当塑性ひずみレンジベア-相当破断繰返し数線図が本研究における有効応力-破断繰返し数線図に密接な関係を持ち、また修正 Manson-Coffin の式が ES マイナー則に対応していると思ふことができる。

以上のような類似性を両者は持っているが、一方で本研究で観察された応力振幅上昇試験での塑性ひずみ幅をもとに考えてみると、菊川らの整理による損傷値は本研究の結果とは逆の結果になり、この矛盾点についてのさらなる研究が必要である。

また、塑性ひずみ・有効応力ともにそのすべてが材料の不可逆変形に寄与しているわけではないと考えられるので、その寄与する程度についての検討も必要であろう。

5 結 言

二段二重負荷応力変動試験における全ひずみ、塑性ひずみ幅、有効応力を測定することによって、次の結果を得た。

(1) 負荷応力 σ_1 , σ_2 が耐久限度の 85 % から 110 % の範囲にあるとき、応力変動後の ε_t , $\Delta\varepsilon_p$ および σ_{eff} はともに過渡的挙動を示し、繰返し数 $n_2=1000$ 回程度のところで安定する。

(2) σ_{eff} は負荷応力の上昇・下降にかかわらず、応力変動後一時的に高い値を示し、その後徐々に減少する。

(3) 応力変動は、その変動方向のいかににかかわらず材料に一時的に大きな損傷を与える。

(4) 応力-ひずみの過渡挙動は力学的安定方向を目標して変動する。この考え方をもとにして、疲労途上における内部応力・有効応力の変動の記述と予測が期待できる。

(5) 変動荷重を受ける材料の疲労損傷の評価では
 ・応力変動による過渡挙動をふくめた材料変形による疲労損傷
 ・負荷が作用し続けることによる強化作用
 とを考慮にいれる必要がある。

(6) (5)に示した2つの要素は負荷履歴によって影響を受けるため、単に負荷応力で損傷を評価するマイナー則では不十分であり、負荷変動を伴う疲労の損傷評価には有効応力に着目した ES マイナー則が有効である。

(昭和63年11月8日 第19回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 中村 宏, 堀川 武, 日本機械学会論文集, **36**, 1059 (1970).
- 2) 田中道七, 出納真平, 日本機械学会論文集, **38**, 16 (1972).
- 3) 三沢啓志, 川田雄一, 日本機械学会論文集, **40**, 1808 (1974).
- 4) 岩崎親裕, 猪飼 靖, 材料, **34**, 1133 (1985).
- 5) 岩崎親裕, 猪飼 靖, 松田 勝, 日本金属学会誌, **51**, 181 (1987).
- 6) 岩崎親裕, 猪飼 靖, 松田 勝, 材料, **36**, 1046 (1987).
- 7) 吉永日出男, 日本金属学会報, **16**, 197 (1977).
- 8) 鈴木 平, “転位のダイナミックスと塑性”, 第7章 (1985) 裳華房.
- 9) 松田 勝, 舌間幸夫, 猪飼 靖, 第一回機械, 構造物の強度設計・安全性評価シンポジウム前刷集, 28 (1987).
- 10) 越智保雄, 日本機械学会論文集, A-47, 1119 (1981).
- 11) T. Hasegawa, T. Yakou, H. Akashi and S. Karashima, Trans. JIM, **19**, 129 (1978).
- 12) S. Takeuchi, J. Phys. Soc. Japan, **27**, 929 (1969).
- 13) 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).