内部応力・有効応力を用いた疲労損傷評価に関する報告[†]

岩 崎 親 裕* 猪 飼 靖** 松 田 勝*

Estimation of Fatigue Damage by Means of Internal Stress and Effective Stress

by

Chikahiro IWASAKI*, Yasushi IKAI** and Masaru MATSUDA*

A new procedure is demonstrated to estimate fatigue damage from the viewpoint of internal stress and effective stress. Constant effective stress fatigue tests were carried out in order to get the *ES-N* (effective stress *vs.* number of cycles to failure) curve, which was similar to the *S-N* curve in its shape. Based on the *ES-N* curve, the cumulative damage or the cumulative cycle ratio was estimated using the fatigue test data under the constant stress amplitude and under the manifold multiple repeated stress in two stress levels.

The main results are as follows:

- (1) The relationship between the effective stress and fatigue damage was independent of load history.
- (2) The values of cumulative cycle ratio for the broken specimens based on the *ES-N* curve were around 1. On the other hand, the values for the unbroken specimens were small, and those values were saturated in the early stage of their fatigue process. These estimations based on the *ES-N* curve were superior to those based on the Miner's rule (*S-N* curve).
- (3) It is important that the maximum stress in service is held below the critical effective stress (fatigue limit represented by effective stress) in designing a structural member to be used over a long period.

キー・ワード：内部応力，有効応力，有効応力一定疲労試験，*ES-N* 曲線，累積繰返し数比

1 緒 言

疲労現象の考察を行うため、著者らは内部応力の観点^{1,2)}から疲労を取り扱ってきた。この「内部応力」とは、材料内部の転位の運動の抵抗となる応力、巨視的には塑性変形の抵抗となる逆方向応力を意味する。したがって、ある大きさの外部負荷応力が働いたとき、それと内部応力との差に当たる「有効応力」が実際に転位線に働く応力であり、それが塑性変形を生じさせている応力である。内部応力および有効応力の考え方は、金属材料の高温強度や結晶塑性の研究においてよく用いられている^{3,4)}。この観点に立てば、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必要となる。

著者らはこのような考え方を疲労過程に適用して、鋼の高サイクル引張圧縮疲労における内部応力・有効応力の測定法、その測定例、およびその有用性について報告し、また疲労限度以下の応力のみによる破壊を

も説明し得ることを報告している¹⁾。さらに、二段多重重複繰返し応力による疲労過程においては、高応力振幅が負荷された直後は、引き続き低応力振幅で測定される内部応力は高応力負荷以前に比べて低下し、有効応力が増加していることを明らかにした。これらの結果、同じ大きさの負荷応力でも履歴によって内部応力⁵⁾が異なることから、負荷応力で整理される Miner 則^{6)~9)}、修正 Miner 則やその他の方法が必ずしも適切でない原因は、有効応力に違いがあるためであることを示唆した²⁾。したがって、有効応力と疲労損傷の関係が明らかになれば、実働疲労における損傷見積り、寿命の予測などに対して良い指針が得られるものと期待される。

本報では、有効応力と材料の損傷との関係を調べるために行った有効応力一定疲労試験（有効応力が一定になるように負荷応力振幅を制御した疲労試験）の結果を示すとともに、一定応力振幅および二段多重重複繰返し応力による疲労に関して、内部応力および有効応力に基づいて疲労損傷評価を行う。

[†] 原稿受理 昭和61年12月25日 Received Dec. 25, 1986

* 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

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、耐久限度付近の応力でも比較的大きな塑性ひずみが生じる機械構造用炭素鋼 S35C であり、850°C、1 hr 加熱後炉冷して、Fig. 1 に示す形状寸法に加工した。平均結晶粒径は約 22μm であった。その化学成分を Table I に示す。

Fig. 1. Configuration of 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	0.025	0.04	0.13	0.09

2.2 実験方法

2.2.1 疲労試験 疲労試験は、電気油圧サーボ式引張圧縮疲労試験機（鷲宮製作所、容量 49 kN）をパーソナル・コンピュータ（日本電気、PC-8001mk II）を用いて制御して、周波数 20 Hz、完全両振り（応力比 $R = -1$ ）にて行った。

実験にあたっては、Fig. 2 に示す測定システムを構成して、パーソナル・コンピュータから D/A 変換器（12ビット）を経由して制御信号を試験機に対し出力する一方、試験機のロードセルより荷重を、また試験片表面に貼付したひずみゲージよりひずみをそれぞれ A/D 変換器（12ビット、2チャンネル）を経由してパーソナル・コンピュータに入力し、応力およびひずみのデータとした。

疲労試験中に適当な間隔ごとに内部応力 σ_i 、有効応力 σ_{eff} 、および塑性ひずみ幅 $\Delta \varepsilon_p$ の測定を行った。このうち σ_{eff} は、最大応力および最小応力が負荷される瞬間に測定し、それら二つの有効応力の絶対値の平均を σ_{eff} とし、 σ_i は負荷応力振幅 σ_a との差、すなわち $\sigma_i = \sigma_a - \sigma_{eff}$ として求めた。 σ_i および σ_{eff} の測定方法は、応力変化法に基づいており、その詳細は別報で報告してある。

2.2.2 有効応力一定疲労試験方法 上述の方法によって疲労中に有効応力を測定し、それが一定になるように負荷応力振幅を変化させていく有効応力一定疲労試験の概要について述べる。

まず予備実験から得られた処女材の内部応力の値（80MPa 程度）に、設定する有効応力の大きさ（ $\sigma_{eff}c$ ）を加えた大きさの負荷応力振幅で疲労試験を開始する。その後、あらかじめ設定された繰返し数ごと（その対数がほぼ等間隔になる繰返し数ごと、すなわち繰返し数 $n = A \times 10^a$ 回、ただし $A = 1, 1.5, 2.2, 3.2, 4.8$ および $6.8, a = 3 \sim 7$ ）に有効応力を測定し、その有効応力の実測値 σ_{eff} と設定有効応力（ $\sigma_{eff}c$ ）とを次式によって比較する。

$$(\sigma_{eff}c) - 2.0 \leq \sigma_{eff} \leq (\sigma_{eff}c) + 2.0 \quad (\text{MPa}) \quad (1)$$

測定された σ_{eff} がこの式(1)を満足するならば負荷応力振幅 σ_a は変更せずにそのまま疲労負荷を続ける。逆に、式(1)を満足しない場合は、それまでの σ_a に $[(\sigma_{eff}c) - \sigma_{eff}]$ を加えた大きさに σ_a を変更して疲労負荷を継続する。すなわち、実測された有効応力が設定値よりも小さければ σ_a を増し、それが設定値よりも大きければ σ_a を減じて疲労負荷を継続する。ここで、 σ_{eff} が設定値になっているかを判定する範囲（ ± 2.0 MPa）は、測定される有効応力の試料標準偏差を目安とした。このように適時、有効応力を一定に保つように負荷応力の大きさを制御して疲労試験を行った。

Fig. 2. The system of testing equipment.

3 実験結果

3.1 S-N 線図

一定応力振幅の疲労試験から得られたS-N曲線をFig. 3に示す。傾斜部は次の式で表される。

$$\sigma_a = -14.81 \cdot \log(N_f) + 277.8 \text{ (MPa)} \quad (2)$$

ただし、 σ_a は負荷応力振幅、 N_f は破断繰返し数である。この式(2)に基づいて Miner 則による累積繰返し数比を求めた。また、破壊確率50%の疲労限度（耐久限度） σ_w は、6本の試験片によるステアケース法で、 $\sigma_w = 187 \text{ MPa}$ と決定され、Miner 則による累積繰返し数比の計算ではこの σ_w 以下の応力による損傷（寿命の消費）は0として取り扱った。

Fig. 3. S-N curve.

3.2 有効応力一定疲労試験および ES-N 線図

有効応力によって生じるひずみが微視的に不可逆な場合に材料にいわゆる損傷を与えることになるとすると、内部応力の上昇による強化で耐え得る限度以上の有効応力が働く場合、材料は損傷を受け、その損傷が累積されていくと疲労き裂の発生・伝ばを促すことになると判断される。

このような疲労損傷と有効応力とがどの程度関係しているかを評価するには、有効応力が一定である疲労試験を行って検討を加えればよい。そこで、有効応力と疲労損傷・疲労寿命との関係を知るため、有効応力一定疲労試験をいろいろな大きさの $(\sigma_{\text{eff}})_c$ で行って、最大繰返し数 10^7 回まで試験して破断の有無、および破断繰返し数を調べた。

その結果、S-N線図の縦軸を有効応力に置き替えた形のES-N線図（ESは有効応力を意味する）とも言える線図が得られた。それをFig. 4に示す。なお、縦軸として用いた σ_{eff} は設定有効応力 $(\sigma_{\text{eff}})_c$ の値ではなく、疲労試験中に実測された有効応力の平均値である。このES-N曲線の傾斜部は次の式で表される。

$$\sigma_{\text{eff}} = -10.17 \cdot \log(N_f) + 128.5 \text{ (MPa)} \quad (3)$$

ES-N線図の形状はS-N線図のそれと非常によく似ており、有効応力が大きいほど疲労寿命が短く、また水平部も現れている。この水平部に相当する応力値を、有効応力での破断に対する耐久限度（臨界有効応

Fig. 4. ES-N curve.

力)と表現して $(\sigma_{\text{eff}})_w$ で表し、この材料では $(\sigma_{\text{eff}})_w = 61 \text{ MPa}$ であった。

つぎに、このES-N曲線で表される有効応力と疲労損傷・疲労寿命との関係が負荷履歴に依存しないことを検証するため、有効応力一定疲労試験による疲労寿命に関して負荷履歴のある試料（履歴材）と負荷履歴のない試料（処女材）との比較を行った。処女材のデータとしてはES-N線図の有効応力 $\sigma_{\text{eff}} = 69 \text{ MPa}$ に対する実験データを用いた。また、履歴材のデータを得るため、耐久限度以下の応力振幅 $\sigma_a = 186 \text{ MPa}$ で 10^7 回疲労させて表面の損傷を研磨除去した試料を用いて、設定有効応力 $(\sigma_{\text{eff}})_c = 69 \text{ MPa}$ の下で有効応力一定疲労試験を行った。Fig. 5にそれらの疲労過程での負荷応力振幅の変化および破断寿命を示す。

Fig. 5. Change in applied stress amplitude σ_a during fatigue under constant effective stress $\sigma_{\text{eff}} = 69 \text{ MPa}$, annealed (virgin) specimen and pre-loaded ($\sigma_a = 186 \text{ MPa}$, 10^7 cycles) one being used. (Notes: x's mark fracture of the specimen.)

処女材での負荷応力振幅が低い値から徐々に増加していくのに対して、履歴材でのそれは初期からほぼ一定で処女材でのそれよりもかなり大きい。履歴材に負荷された応力振幅は約 210 MPa であり、この応力振幅でのS-N曲線による推定寿命を1とすると、履歴材の寿命は 18.7 と極端に大きくなる。一方、ES-N曲線から推定される有効応力 $\sigma_{\text{eff}} = 69 \text{ MPa}$ での寿命を1として評価する場合、この履歴材の寿命は 0.78 であり、その値は処女材での寿命 1.58 とともにES-N曲

線そのもののばらつきの範囲内であると考えられる。したがって、 $S-N$ 曲線が履歴材に対しては全く意味をなさないのに対し、有効応力を用いた $ES-N$ 曲線は負荷履歴のある材料に対しても十分に適用できると結論される。また、得られた臨界有効応力は負荷履歴に影響されず、 $S-N$ 曲線での耐久限度と違ってそれ以下では決して破壊を起こさない限界値であると言える。

これらのことから、 $ES-N$ 曲線で表される有効応力-破断繰返し数関係を用いると、負荷履歴を特に考慮することなく材料学的な根拠に基づいた疲労損傷の評価を容易に行うことができるものと期待される。つぎに、その検討を行う。

3.3 累積損傷の評価

ここでは、 $ES-N$ 曲線を基に疲労試験データを整理して、有効応力を用いた損傷則の確立の可能性を探る。

Table II に、 $S-N$ 曲線を用いた Miner 則による破断時または試験打ち切り時の累積繰返し数比 $\sum(n_i/N_i)_S$ と比較して、 $ES-N$ 曲線に基づいて Miner 則流に計算した累積繰返し数比 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ を示す。試験片 No.1~8 は一定応力振幅による結果 (Fig. 3 の基本 $S-N$ 曲線が得られたデータ) を評価したもので、また試験片 No.9~13 は二段多重重複繰返し応力による疲労試験による結果を評価したものである (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および $n_1 = \sum n'_1$ 、 $n_2 = \sum n'_2$ である)。これらの疲労試験中の適当な間隔ごとに測定した有効応力のデータを用いて $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ の計算を行った。

一定応力振幅による場合の破断した試験片 (試験片 No.4~8) について結果を見ると、Miner 則による $\sum(n_i/N_i)_S$ は、かなり 1 に近い値になっている (これらは $S-N$ 線図の実験点になっているので当然である)。一方、有効応力で整理した $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ の方も、No.5 の 0.396 を除くと 1 に近い値である。

つぎに、一定応力振幅の場合の非破断の例 (No.1~3) を見ると、No.1 と 2 は耐久限度以下なので当然 $\sum(n_i/N_i)_S$ はともに 0 であるが、一方、 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ はそれぞれ 0.004、0.261 となっている。それぞれの疲労中の有効応力 σ_{eff} は、繰返し数がそれぞれ 7×10^3 回、および 1×10^5 回を越えてからは $\sigma_{eff} < (\sigma_{eff})_W$ となっており、それ以後は損傷値としては加算されず、累積繰返し数比の計算の対象外になっている。すなわち、疲労損傷はある時点で飽和していたことを意味し、内部応力の上昇による強化が損傷よりも勝ってしまった結果 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ は小さい値でとどまったことになる。

この 2 例とは違って、非破断の No.3 の場合は $\sum(n_i/N_i)_S > 16.669$ 、および $\sum(n_i/N_i)_{ES} = 0.946$ と累積繰返し数比は大きくなっている。これは、その応力振幅が耐久限度の直上であることから、疲労破壊しないほぼ上限の応力振幅で疲労させていたため、先の 2 例よりも損傷値が大きくなったものと理解される (耐久限度は破壊確率 50% であるのでそれ以上での非破断試料も存在する)。ここで、Miner 則による $\sum(n_i/N_i)_S$ を不等号で表したのは、負荷応力が耐久限度以上であるから、この応力振幅が変らない限り疲労負荷を続けると累積繰返し数比は増加し続けることを表現

Table II. Results of fatigue test under constant stress amplitude and manifold multiple repeated stress in two stress levels.

Specimen number	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	n'_1	n'_2	N_f	Cumulative cycle ratio			
						Based on Miner's rule ($S-N$ curve)			Based on new method ($ES-N$ curve)
						n_1/N_1	n_2/N_2	$\Sigma(n_i/N_i)_S$	$\Sigma(n_i/N_i)_{ES}$
1	182	—	—	—	Unbroken	0	—	0	0.004
2	182	—	—	—	Unbroken	0	—	0	0.261
3	192	—	—	—	Unbroken	>16.669	—	>16.669	0.946
4	192	—	—	—	4.676×10^5	0.779	—	0.779	0.685
5	197	—	—	—	2.944×10^5	1.052	—	1.052	0.396
6	202	—	—	—	3.126×10^5	2.396	—	2.396	0.949
7	202	—	—	—	9.447×10^4	0.724	—	0.724	1.044
8	207	—	—	—	7.912×10^4	1.300	—	1.300	1.268
9	206	98	200	9800	Unbroken	>3.894	0	>3.894	0.266
10	206	181	200	9800	Unbroken	>4.178	0	>4.178	0.030
11	206	157	200	9800	Unbroken	>3.041	0	>3.041	0.214
11'	206	$<157>$	200	$<9800>$	1.102×10^7	10.630	0	10.630	0.719
12	206	191	200	800	6.518×10^5	1.840	0.746	2.586	0.730
13	206	191	500	500	6.631×10^5	4.678	0.474	5.152	0.538

[Notes] Specimens, No.1~8, were fatigued under constant stress amplitude, and the other specimens, No.9~13, were fatigued under manifold multiple repeated stress in two stress levels. Number 11' was fatigued under constant stress amplitude σ_1 , after the test of No.11.

するためである。一方、 $ES-N$ 曲線に基づく $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ の表示には等号を用いており、その理由は、先の2例と同様に損傷が飽和して累積繰返し数比はそれ以上増加しないということにある。このことを No. 7 および No. 3 の疲労進行に伴う損傷値（累積繰返し数比）の変化を比較することにより説明する。

Fig. 6 に No. 7 (破断) の、Fig. 7 に No. 3 (非破断) の疲労進行に伴う Miner 則での累積繰返し数比 $\sum(n_i/N_i)_S$ および $ES-N$ 曲線に基づいた累積繰返し数比 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ の推移を示す。Miner 則による $\sum(n_i/N_i)_S$ は繰返し数の増加から単純計算した結果であるから、どちらの図においてもその推移の傾向は同一である。一方、 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ は、破断した場合 (No. 7) に疲労初期からかなりの損傷があるため増加していくのに対し、破断しなかった場合 (No. 3) には初期の大きな損傷が見られず徐々に増加して 2×10^6 回以後は飽和している。後者の損傷の飽和は $\sigma_{eff} < (\sigma_{eff})_W$ となったためである。 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ の値が大きいということについては今後検討を要するが、No. 3 の結果とは逆に破断した試験片 (No. 4~8) については、最後に測定された有効応力も $(\sigma_{eff})_W$ を越えていたということが確認されており、それらの試験片は損傷が飽和する以前に、すなわち効果的な強化作用が

働くまでに破断したものとと言える。

続いて、二段多重繰返し応力によって破断した例 (No. 11'~13) を見ると、Miner 則による $\sum(n_i/N_i)_S$ が、10.630, 2.586, および 5.152 であるのに対して、 $ES-N$ 曲線に基づいた $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ はそれぞれ 0.719, 0.730, 0.538 であり、後者の方法による方がはるかに 1 に近い値を得ている。すなわち、Miner 則で評価するともっと小さい繰返し数で破断しなければならない試験片が、測定された有効応力から判断すると推定寿命にかなり近い繰返し数で破断したということになる。一方、破断していない例 (No. 9~11) でも Miner 則による $\sum(n_i/N_i)_S$ は同様に大きな値であるのに対して、 $ES-N$ 曲線に基づいた $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ は 0.030~0.266 と小さく、疲労損傷が小さいことを表示するのに成功している。

これらの二段多重繰返し応力による疲労試験結果は、Miner 則の値がすべて 1 よりも大きいという顕著な過小応力効果が現れた結果ばかりであるが、新しい方法の $ES-N$ 曲線に基づいた $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ は過小応力による強化作用を内部応力を通じて考慮して、純粋に損傷成分のみを評価できたものと考えられることができる。

4 考 察

4.1 有効応力と損傷および耐久限度

以上のように、有効応力が履歴に関係なく損傷の程度を表すこと、疲労破壊につながる損傷は有効応力が臨界有効応力よりも大きいときに生じることが示された。一方、別報でその有効応力は負荷応力と内部応力¹⁾²⁾とによって決まり、内部応力が疲労過程で変化することがそのまま有効応力の変化となって現れてくることが示されてきた。そこで、鋼の疲労現象と耐久限度について次のように理解することができる。

鋼の疲労過程は、転位の増殖とその規則配列化を主因とし、ひずみ時効の助けを借りて内部応力が上昇していくことによる強化と、有効応力による損傷の累積との競合過程である。また、耐久限度は、有効応力により累積されていく損傷がある臨界値に達する以前に、内部応力の上昇によって材料が強化され、その強化作用により有効応力がその材料の臨界有効応力以下に抑制されるときに現れる。

4.2 累積損傷の評価と耐疲労設計への応用

有効応力を考慮した累積損傷の評価についてさらに検討を加えるため、Table II の結果を理解しやすいように図示して考察する。Miner 則に基づいた累積繰返し数比 $\sum(n_i/N_i)_S$ と $ES-N$ 曲線に基づいた新しい方法による累積繰返し数比 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ を、それぞれの各値の生起した累積頻度との関係で表し、破断例について Fig. 8 に、非破断例について Fig. 9 に

Fig. 6. Change in values of cumulative damage (or cumulative cycle ratio) estimated by two methods, Miner's rule ($S-N$ curve) and a new method ($ES-N$ curve), during fatigue of specimen No. 7; broken.

Fig. 7. Change in values of cumulative damage (or cumulative cycle ratio) estimated by two methods, Miner's rule ($S-N$ curve) and a new method ($ES-N$ curve), during fatigue of specimen No. 3; unbroken.

Fig. 8. Relationship between values of cumulative damage (or cumulative cycle ratio) estimated by two methods, Miner's rule ($S-N$ curve) and a new method ($ES-N$ curve), and their cumulative frequencies (broken, number of data=8).

Fig. 9. Relationship between values of cumulative damage (or cumulative cycle ratio) estimated by two methods, Miner's rule ($S-N$ curve) and a new method ($ES-N$ curve), and their cumulative frequencies (unbroken, number of data=6).

示した。ここで、これらの図の縦軸の累積頻度とは、横軸で表される累積繰返し数比以下であった試料数を表す。

破断した場合、Miner 則による累積繰返し数比がかなり大きくずれているのに対して、 $ES-N$ 曲線に基づいた累積繰返し数比は 1 に近い値がほとんどである。また、非破断の場合も Miner 則では大きな累積繰返し数比を与える例が多いのに対して、 $ES-N$ 曲線に基づいた累積繰返し数比は 1 例を除いて 0 に近くなっていることがわかる。

つぎに、 $ES-N$ 曲線に基づいた累積繰返し数比 $\Sigma(n_i/N_i)_{ES}$ の破断した場合と非破断の場合との比較を Fig. 10 に示す。非破断の 1 例を除くと破断の場合の累積繰返し数比の方が非破断の場合のそれよりも大きく、疲労損傷を妥当に評価しているものと言えよう。ところで、非破断での $\Sigma(n_i/N_i)_{ES}$ が 1 に近いという特異例は、No. 3 の耐久限度直上の応力による結果であり、前節で述べたようにその損傷は飽和していたことから、有効応力によって損傷を妥当に評価できていたが、試料のばらつきや有効応力の測定精度に原因

Fig. 10. Relationship between values of cumulative damage (or cumulative cycle ratio) estimated by new method ($ES-N$ curve) and their cumulative frequencies, both upon broken data and unbroken data.

があって値が大きくなったものと思われる。

さて、本実験での Miner 則による累積繰返し数比は 1 よりかなり大きくなる例が多い。いま仮に Miner 則を修正した種々の方法による累積繰返し数比の算出方法（例えば、修正 Miner の方法など）で本結果を評価するとしても、それらはほとんど Miner 則の累積繰返し数比よりも大きくなる修正法を用いているので、さらに大きく 1 からずれることになる。したがって、本実験結果に関しては有効応力で整理する効果は非常に大きいものと言えよう。

以上のことから、 $ES-N$ 曲線、すなわち有効応力に基づいて損傷を評価することが優れた方法であることがわかった。ここで、この考え方を実際の疲労負荷を受ける機械構造部材の設計に応用する方法についてひとつの提案をする。ただし、ここでは純粋に負荷だけを考慮して、負荷の休止、周波数変動、大きな温度変化、腐食等の他の要因は考慮しない。

さて、設計基準の検討にあたっては、本研究および別報²⁾で得られた結果のうち、

(1) 有効応力が臨界有効応力 $(\sigma_{eff})_w$ を越えなければ疲労破壊を起こさない。

(2) 内部応力は負荷履歴によって変動し得る。という二つの重要な結果を適用する。

そうすると、設計される部材の期待される耐用期間が半永久的であるものに対しては、仮に内部応力が負荷履歴によって 0 になることがあっても安全であるように、最大負荷応力が臨界有効応力の大きさを越えないように設計を行うことが重要であるという指針が得られる。

この基準を本研究で用いた材料に適用すると、その臨界有効応力 (61 MPa) は耐久限度 (187 MPa) の約 1/3 であり、耐久限度の 1/3 程度が設計¹³⁾の基準となる。耐久限度とこの設計応力との比は実例ともよく一致しており妥当な値と考えられる。

一方, あらかじめ耐用期間を短く設定して有限寿命であることを許容するような場合については, この基準では過度に安全側になるので, 設計に際して寿命見積りを行うことが必要とされる. この寿命の見積りについては, 予測される有効応力を評価するために内部応力変化を推定しなければならないので, $ES-N$ 線図を利用した簡便な手法を考案する必要がある, 今後の研究に期待される.

5 結 言

鋼の疲労過程において, 内部応力・有効応力および塑性ひずみ幅などを測定し, 次の結果を得た.

(1) 有効応力一定疲労試験を行い, $S-N$ 曲線の縦軸を有効応力に置き替えた形の $ES-N$ 曲線が得られた. それには水平部も現れ, 破断に対する有効応力の耐久限度 (臨界有効応力) が得られた.

(2) 処女材と, 耐久限度以下で 10^7 回疲労させた試験料とを用いて同じ大きさの有効応力による有効応力一定疲労試験を行ったところ, それらの寿命はほぼ同じで, 有効応力と損傷との関係は負荷履歴に依存しないことが示された.

(3) 一定応力疲労試験結果について, 疲労試験中に測定された有効応力を用いて累積繰返し数比を計算した. そのうち, 破断した試験 5 例の $ES-N$ 曲線に基づいた累積繰返し数比 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ は, 0.396~1.268 と, 1 に近い結果が得られた.

また, 10^7 回まで非破断であった試験 3 例の $ES-N$ 曲線に基づいた累積繰返し数比 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ は, 0.004, 0.261, および 0.946 であり, いずれも試験の途中で有効応力が臨界有効応力より低下して損傷の飽和を示していた.

(4) 二段多重複繰返し応力による疲労試験結果について, $ES-N$ 曲線に基づいた累積繰返し数比 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ を計算した. 破断した 3 例では, それらの値は 0.538, 0.719, および 0.730 であり, それぞれの Miner 則による累積繰返し数比 5.152, 10.630, および 2.586 よりもはるかに 1 に近い値を示した.

一方, 非破断であった 3 例では, Miner 則による累積繰返し数比はそれぞれ 3.894, 4.178, および 3.041 であり, 破壊していないにもかかわらず 1 より

かなり大きな値であったのに対し, $ES-N$ 曲線に基づいた累積繰返し数比 $\sum(n_i/N_i)_{ES}$ は 0.266, 0.030, および 0.214 と小さな値であった.

(5) 鋼の疲労現象について次の考え方を示した. 鋼の疲労過程は, 転位の増殖とその規則配列化を主因とし, ひずみ時効の助けを借りて内部応力が上昇していくことによる強化と, 有効応力による損傷の累積との競合過程である.

耐久限度は, 有効応力により累積されていく損傷がある臨界値に達する以前に, 内部応力の上昇によって材料が強化され, その強化作用により有効応力がその材料の臨界有効応力以下に抑制されるときに現れる.

(6) 長期の耐用期間が要求される機械構造部材の耐疲労設計にあたっては, 予測される最大負荷応力がその材料の臨界有効応力以下であるように設計することが重要であることを提案した.

(昭和61年11月12日 第18回疲労シンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) 岩崎親裕, 猪飼 靖, 材料, **34**, 1133 (1985).
- 2) 岩崎親裕, 猪飼 靖, 松田 勝, 日本金属学会誌, **51**, 181 (1987).
- 3) 長谷川 正, 及川 洪, 日本金属学会会報, **11**, 192 (1972).
- 4) 吉永日出男, 日本金属学会会報, **16**, 197 (1977).
- 5) M. A. Miner, J. Appl. Mech., **12**, A-159 (1945).
- 6) H. T. Corten and T. J. Dolan, Proc. Int. Conf. Fatigue of Metals, p. 235 (1956).
- 7) 河本 実, 中川隆夫, 材料, **14**, 176 (1965).
- 8) 川田雄一, 中沢 一, 材料試験, **6**, 368 (1957).
- 9) A. M. Freudenthal and R. A. Heller, J. Aero/Space Sci., **26**, 431 (1959).
- 10) 鈴木 平, “転位のダイナミックスと塑性”, p. 169 (1985) 裳華房.
- 11) A. A. Solomon, Rev. Sci. Instr., **40**, 1025 (1969).
- 12) C. N. Ahlquist and W. D. Nix, Scripta Metallurgica, **3**, 679 (1969).
- 13) 中村 宏, 田中真一, “機械の疲れ寿命算出法”, p. 262 (1972) 養賢堂.