動電形引張圧縮ランダム疲労試験装置とこれによる実験例*

菊 川 真** 大 路 清 嗣** 城 野 政 弘***

The Random Fatigue Testing Apparatus and Some Testing Results

by

Makoto KIKUKAWA, Kiyotsugu OHJI

(Faculty of Engineering, Osaka University, Osaka)

and Masahiro JONO

(Graduate Student of Osaka University, Osaka)

A push-pull random load fatigue testing apparatus of electro-dynamic type was newly designed and constructed. In order to conduct random load fatigue tests of both narrow and fairly wide bandwidth, the apparatus was required to keep its frequency response flat from 20 cps to 175 cps by means of a negative feedback of velocity of the moving coil. The stress on the test specimen was measured by using an extensometer of a semi-conductor strain gage type or of a capacity type. The plastic strain of the test specimen was determined by subtracting the elastic strain from the total strain. The stress and the plastic strain were observed by an oscilloscope, and were counted on line by level crossing counters throughout the random load fatigue test. The drift of average stress amplitude for a long period was controlled by comparing an average voltage of a rectified signal of the load cell output with a pre-setted reference voltage.

The fatigue tests were conducted with unnotched specimens of 0.2 percent carbon steel under the condition of random loading of a narrow band, in addition to the constant stress amplitude test. It was found that a linear cumulative damage assumption expressed in terms of the plastic strain range, gave a good approximation for life prediction.

(Received Nov. 16, 1967)

1 ま え が き

ランダム荷重の下における疲労強度の問題は、実用上重要であり、理論的にも興味深いが、その試験装置には次のような困難さがある。

ランダム荷重疲労試験では荷重波形の周波数スペクトルは、一定荷重振幅試験または通常のプログラム試験におけるように単一の線スペクトルでなく、ある帯域幅をもち、その帯域幅で試験装置の周波数特性が平坦になるように補償できなければならない。それには少なくとも荷重装置の補償可能な周波数特性の範囲がこれに充分であるとともに、荷重装置の可動部と試験片の作る振動系の最低固有振動数がその範囲より高くなければならない。したがって、試験片の負荷端の試験応力レベルにおける変位が小さい、いわゆる剛い負荷方式であるとともに、荷重装置としては（最大荷重）÷（可動部重量）＝（最大加振加速度）÷（重力加速

度）＝（最大加振加速度を g で表わした値）が大きいることが必要である。また線スペクトルの場合には、たとえば共振形疲労試験機あるいは通常の油圧式パルセータなどにおけるように、負荷装置のなす仕事のうちで弾性ひずみエネルギーに対応する大部分を共振質量、あるいははずみ車の運動エネルギーとしてたくわえることができるが、帯域幅のある場合にはこれが不可能であるから、負荷動力源はこれに対応する無効仕事をも供給する大容量のものが必要となる。

ランダムを含む任意波形の信号源は電気的なものとならざるをえないが、その増幅（制御）、変換（負荷）装置としては上述の周波数範囲、最大加速度の点から現在のところ電力増幅器と動電形変換器（加振器）か、サーボ弁と油圧アクチュエータの方式に限られるように思われる。動電形は周波数範囲の上限を高くでき、電気油圧方式は大荷重容量に適すると思われるが、いずれも前述のとおり同一荷重容量の一定振幅あるいはプログラム疲労試験装置に比べ少なくとも数倍以上の出力容量を要し、高価なものとなる。

* 原稿受理 昭和42年11月16日

** 正 会 員 大阪大学工学部 大阪市都島区東野田町 9 丁目

*** 正 会 員 大阪大学大学院 大阪市都島区東野田町 9 丁目

また、ランダム荷重疲労試験では低い応力レベルを多く含むから試験時間も長くなり、試験コストはさらに高くなるわけで、本来直接に実用的な試験を行なうよりは基礎的な実験に重点をおき、プログラム試験などの、より低いコストの試験にて、どのように置き換えられるかを見いだすことを主眼とすべきである。ところが、いままでに行なわれているのは、Head¹⁾ら Kowalewski²⁾, Fralich³⁾ の小形動電形試験装置による平面曲げ試験、Leybold⁴⁾ らの電気油圧式試験装置による引張圧縮試験など、いずれもアルミニウム合金の切欠き試験片についてのものであって、やや断片的なものが多く、むしろ実用的見地からのものがおもしろいようにも見受けられる。しかし、これは試験装置の荷重容量が小さいため、負荷方式と固有振動数の関係から実験の容易な範囲がまぎらなわれたとも考えられ、いずれにしても基礎的な問題の解決が緒についたとはいまだ言いがたいようである。

ランダム荷重による疲労では、時間強度あるいは疲労寿命が問題であるから、切欠きなど部材の形状、使用条件によっては、疲労き裂の発生とともにその進行速度が重要な問題となることがある。しかし、ここにはまずき裂発生までの寿命についておもに考えることとする。低繰返し数疲労の領域ではすでに明らかなように、繰返し塑性ひずみは疲労破壊の一つの主要な因子であり、また、疲労試験中繰返し応力と対応し連続して測定できる唯一の因子でもある。したがって、高い応力レベルを含むランダム荷重による疲労の問題の基礎的な研究においても、繰返し塑性ひずみは少なくともある場合には、応力と疲労破壊の間の重要な情報を与える可能性のある因子と考えられる。

したがって、ここ数年来筆者らの研究室では、次の方針によりランダム荷重による疲労の基礎的な研究を進めてきた。すなわち、応力とひずみの分布が一様で解析に困難の少ないと思われる平滑試験片の引張圧縮試験を選び、繰返し応力とともに繰返し塑性ひずみを精密に測定し、まず塑性ひずみと疲労破壊の間の関係、応力と塑性ひずみの間の関係を調べ、これら二つの関係に影響する他の因子を逐次調べていく方法であって、比較的複雑と思われる応力と塑性ひずみの関係については、疲労試験中連続して情報が得られる利点がある。なお、小形平滑試験片の荷重を制御した高繰返し数領域の引張圧縮試験では、巨視的き裂が発生してから破断までの期間の全寿命中で占める割合が小さく、破断寿命を同時にほぼ巨視き裂発生までの寿命とみなしても、結論に大きい誤りを生ずることは通常ないと思われるので、き裂の観察、判定のわずらわしさを避けることができる。このようにしていままでに試験装置、測定方法などはほぼ完成し、ランダム荷重による疲労の基礎的な問題についてもある範囲の見通しが得られた。ここにはページ数の関係上これらのうち試験装置、測定方法の詳細と実験結果の若干例について記すこととしたい。

2 試験装置

試験装置の荷重容量は、直径3mm程度の平滑試験片の引張圧縮試験に必要な±400kg 見当でよい。したがって周波数上限の高いことから、また既設の電力増幅器などが一部利用できること、当時特性のよいサーボ弁などの入手が容易でなかったこともあって動電形を用いた。Fig. 1 のブロック線図に示すように、ランダム信号発生器により発生されたガウス性白色ラン

Fig. 1. Block diagram of fatigue testing apparatus.

ダム雑音を、適当なる波器を通して所定のパワースペクトルをもつランダム雑音信号とし、前置増幅器、電力増幅器で増幅、出力変成器を介して動電形変換器(加振器)の可動コイルを駆動し、これに直結された試験片に入力信号電圧に比例した引張圧縮ランダム荷重を加えようとするものである。なお、応力レベルの長時間にわたる精度を保つための制御装置、応力、塑性ひずみの測定装置を備えている。本研究の開始時には適当な既製品がほとんどなかったで、大部分は筆者らの研究室で設計、部分的に外注、あるいは部品を集め組み立てたものである。

2・1 ランダム信号源

ランダム荷重の信号源としては、たとえば航空機の突風荷重、自動車の路面の凹凸による振動荷重など、実際の荷重波形をそのまま用いることも考えられるが、基礎的な研究には典型的なランダム荷重のモデルから出発するのがよいと思われる。そこで最も基本的なモデルとして、ガウス性白色ランダム雑音により、一自由度の線形振動系が加振されたときの応力波形を選び、共振せん鋭度のことになった若干個の場合を取り上げた。ガウス性ランダム雑音はパワースペクトル密度のみにより統計的に完全に規定される点で基本的なモデルとして適当である。またガウス性ランダム雑音は線形のいかなる回路を通ってもガウス性を失わない。さらに、非ガウス性ランダム雑音も線形の狭帯域ろ波器を通ると、すなわち共振せん鋭度の高い線形振動系に加えられたときの応答は、近似的にガウス性雑音となる。多数の互いに独立な非ガウス性ランダム雑音を加え合わせるとガウス性に近づく、などの性質がある。したがって実際のランダム波形にはガウス性ランダム波形で近似できるものが多いと思われる。

ガウス性白色ランダム信号発生器としては、当学部⁸⁾の電子工学教室宮脇一男教授の研究室で開発された、次の方式のものを同研究室にて製作していただいて用いた。サイラトロン雑音を $455 \pm 8\text{kc/s}$ で平坦な A.G.C. で安定化した狭帯域増幅器で増幅して得る、 455kc/s を搬送波とした $0 \sim 8\text{kc/s}$ のランダム信号を、リング復調して $0 \sim 8\text{kc/s}$ で平坦なガウス性白色ランダム信号を得るもので、詳細は省略するが、この実験に十分な特性をもち、特に疲労試験に重要な長時間にわたる安定性がきわめてよい。なお、実験に不用な帯域を除去しておくためにしゃ断周波数を段階的に変えられる 16db/octave の低域および高域ろ波器を備えている。

一自由度の線形振動系は演算増幅器を用いた Fig. 2 (a) に示す回路でアナログした。Fig. 2(b) にその特性を示す。なお、 $Q > 50$ では比較的容易に充分な安定性が得られる点で Fig. 3 (a) に示すような固有振動数が微調整できるチタン酸ジルコン酸鉛を張った2個

Fig. 2. Electric circuit of filter and output characteristics against frequency.

(a) Shape of the tuning-fork used
(b) Schematic diagram and principle of mechanical filter

Fig. 3. Mechanical filter.

の音叉を、少し固有振動数をずらせて同図(b)のように結合した機械的ろ波器をも用いた。

なお、信号源には一定振幅試験のための低周波発振器をはじめ各種プログラム波形の発生装置、また、実

Fig. 7. Frequency response of testing apparatus.

帰還とともに Fig. 4 ② の帰還端子に入れ、Fig. 7 (a) に見られるように、175 c/s まで平坦な周波数応答が得られた。最低固有振動数 415 c/s の付近まで平坦になっていないのは、加速度素子を取り付けの関係上可動コイルの中心でなく、周上に置いたためと思われるが、さしあたり使用する周波数範囲にさしかえないのでそのままにしてある。

ロードセル上面の固定端は、その水平位置および傾斜を Fig. 5 の A、B 2 点の周囲に配置した 4 本ずつ 2 組の締付けボルトの締加減により、A、B 2 点を関節として微細調節できるようにしてあり、ロードセルおよび伸び計で試験片の曲げを検出しながら、これを完全に取り除くように試験片を取り付けることができる。

2・3 荷重の測定および制御装置

荷重は、Fig. 8 に示すロードセルの軸方向および周方向に 4 枚ずつ張った、自己温度補償形抵抗線ひずみゲージにより検出する。これらのゲージは目盛付 10 回

Fig. 8. Load cell.

転ポテンショメータを用いたバランス回路をもち、安定化された 6 VD.C. を供給される直流ブリッジに組まれ、その出力は充分安定化された直流増幅器を経て二現象シンクロスコープの縦軸、荷重（応力）のレベルクロッシングカウンタ、データレコーダ、あるいはペン書きオシログラフなどに接続される。ブリッジ供給電圧をはじめ、これら測定装置の安定化には充分注意を払った。

なお、軸方向のゲージは向かい側の 2 枚ずつを差動

的に組み合わせ、直交する二面内の曲げの検出ができるように接続の切り替えが可能になっている。

ブリッジのポテンショメータの目盛をあらかじめ荷重で較正しておけば、一定振幅試験のときの荷重振幅はシンクロスコープ上で荷重波形の山と谷を、零レベルの基準線に合わせて、それぞれポテンショメータの目盛を読むことにより、零位法に準じ測定できる。レベルクロッシングカウンタなどもこの目盛を基準に較

正できる。山と谷の目盛を読む間の零レベルのドリフトは、理論的には測定誤差になりうるが、時間が短いので実際は問題にならない。高繰返し数領域の引張圧縮試験であるから応力は荷重からただちに求まる。

ランダム荷重試験の際には、荷重したがって応力のレベルクロッシング数をシュミット回路を用いた電圧比較回路にて検出し、数段のフリップフロップ二進回路あるいはデカトロンを前置し、電磁カウンタにより 10 レベルについてオンラインに測定した。いまの場合、荷重は正負対称であるから一方についてのみ測定すればよい。

疲労試験においては、荷重レベルの少しの誤差は疲労寿命に 10 倍程度に拡大されて影響するので、長い試験時間にわたり荷重レベルの精度を充分に保つ必要がある。そのためロードセルの出力の交流成分を整流し、帯域幅に応じゆらぎのなくなるに充分な時間にわたり平均したものを基準電圧と比較し、その偏差によりサーボモータで前置増幅器と主増幅器の間のアテネータを動かした。すなわち、荷重振幅の長い時定数の平均値の負帰還による荷重レベルの安定化を図った。

2・4 塑性ひずみの測定および塑性ひずみレンジのカウント装置

この試験装置では、出力変成器のため出力電流の直流成分はまったくしゃ断されており、構造上からも試験片に作用するのは可動コイル部をささえるベリウム銅の板ばねによる、ごく弱い復元力のみで平均荷重はまったく作用しない。このような場合には少なくとも高繰返し数領域では、一方向への塑性ひずみは破断延性に比べ無視できる程度であり、疲労寿命に影響を与えることはまずない⁹⁾。したがって、おもに考えるべきものは繰返される塑性ひずみの変化、たとえば塑性ひずみレンジ（相隣る極値の差） $\Delta \epsilon_p = \epsilon_{pmax} - \epsilon_{pmin}$ である。また、このように平均荷重の作用しない場合にも、荷重を制御した疲労試験では試験片の変形は直接拘束されていないので、Fig. 14 にも見られるように、塑性ひずみレンジの変化する場合はもちろん、変化のない場合でもその中点、すなわち平均塑性

ひずみ $\varepsilon_m = (\varepsilon_{p\max} + \varepsilon_{p\min})/2$ は塑性ひずみの繰返しに伴いゆっくりとした漂動を生ずる。したがって、 $\varepsilon_{p\max}$ あるいは $\varepsilon_{p\min}$ のひん度分布を求めても基準とする塑性ひずみの零点が定まらないから意味のある結果が得られない。したがって、ここでは塑性ひずみレンジをカウントすることを考える。

まず、塑性ひずみは次の方法により測定する。試験片の両肩間の全伸び δ を、Fig. 9 に示すような半導

Fig. 9. Semi-conductor strain gage type extensometer.

体ひずみゲージを用いた、またぎゲージ方式の伸び計により検出する。このうちの弾性伸び δ_e は荷重に比例するから、Fig. 8 のロードセルに取り付けた同じ形式の伸び計の出力に適当な比例定数をかければ得られ、これを差し引けば塑性伸び $\delta_p = \delta - \delta_e$ が求まる。したがって、この演算を電気的に行なえばよい。比例定数を定めるには、位相差のないよう調整したシンクロスコープの X, Y 軸にそれぞれ塑性伸び $\delta - \delta_e$ 、荷重を入れてヒステリシスを観察し、塑性ひずみレンジが当然零となるような低い応力レンジに対して、これが Y 軸に重なる一直線になり X 軸の出力 $\Delta\delta - \Delta\delta_e$ が零となるように、比例定数を設定するポテンショメータを調節すればよい。半導体ゲージを用いたのは、ひずみ感度係数が普通ゲージの数十倍あり信号対雑音比が大きく、このように差し引きして小差を求めるに適するためで、弾性ひずみレンジが 0.3% のとき 0.01% 程度の塑性ひずみレンジを充分測定できる。抵抗の温度係数は大きいから、薄い板の表裏のゲージで互いに補償され、感度の温度係数は定電流ブリッジ回路とすることにより小さくできる。なおこの伸び計には、ロードセルと同様、90°ごとに4個のまたぎゲージが周上に配置してあり、切り替えにより直交する二面内の曲げが検出できるようになっている。

しかし弾性ひずみレンジが 0.5% をこえ、かつ塑性ひずみレンジが小さいときには非線形性、ゲージの許容ひずみの点でこの方式では測定が困難となるので、Fig. 10(a) に示す容量ブリッジ方式の伸び計をも試作

Fig. 10. Capacity bridge type extensometer.

使用した。電気回路は Fig. 10 (b) のようで、搬送周波数 4 Mc/s の岩崎通信機製の微小変位計を改造したものである。

このようにして求めた塑性伸び δ_p は直径 d_0 、応力 σ および塑性ひずみ ε_p が一樣な長さ l_0 の平行部の塑性伸びのほか、Fig. 11 (a) に示すように、その両側に隣接する長さそれぞれ a の直径 d' 、応力 σ' 、塑性ひずみ ε_p' が平行部の端からの距離 x により変化するフィレット半径 R のフィレット部の塑性伸びをも含む。したがって、 ε_p は δ_p から $\delta_p = \varepsilon_p l_p$ なる相当平行部長さ l_p を次のように見積って求める。簡単のためいまかりに ε_p' が σ'^m に比例すると仮定し σ' は断面積 $\pi/4d'^2$ に逆比例すると考えれば

$$\varepsilon_p' = \varepsilon_p \left(\frac{\sigma'}{\sigma} \right)^m, \quad \sigma' = \sigma \left(\frac{d_0}{d'} \right)^2, \quad (1)$$

$$\delta_p = \varepsilon_p l_p = l_0 \varepsilon_p + 2 \int_0^a \varepsilon_p' dx \quad (2)$$

$$l_p = l_0 + 2 \int_0^a \frac{\varepsilon_p'}{\varepsilon_p} dx = l_0 + 2 \int_0^a \frac{dx}{\left\{ 1 + 2 \frac{R}{d_0} \left(1 - \sqrt{1 - \left(\frac{x}{R} \right)^2} \right) \right\}^{2m}} \quad (3)$$

となり、 $l_p - l_0$ は m と試験片の形状のみにより定まる。

前述のとおり、おもに考えるべきものは塑性ひずみ ε_p よりむしろ塑性ひずみレンジ $\Delta\varepsilon_p$ であるが、以上

(a) Computation of equivalent gage length
(b) Hysteresis loops detected by strain gages bonded directly on specimen (Left) and by extensometer (Right).

Fig. 11. Equivalent gage length of test specimen.

の諸式は δ_p , ϵ_p , ϵ_p' , σ , σ' の代わりに $\Delta\delta_p$, $\Delta\epsilon_p$, $\Delta\epsilon_p'$, $\Delta\sigma$, $\Delta\sigma'$ を入れてもまったくそのまま成立し、かつ後述のようにこの場合には $\Delta\epsilon_p' = \Delta\epsilon_p (\Delta\sigma'/\Delta\sigma)^m$ の関係が実際によくなりつつ、このとき m のとる値の範囲 $m=5\sim 9$ にて Fig. 13 の試験片について l_p を計算すると、Fig. 11 (a) に示すようになり、 m による l_p の値の変化は小さく約 7% 以内にとどまる。

また、次のように試験片に直接張ったひずみゲージを基準として、相当平行部長さ l_p を求めることなく、伸び計を直接塑性ひずみレンジ $\Delta\epsilon_p$ に対し較正することもできる。伸び計にて検出される全伸びレンジ $\Delta\delta$ は、 $\Delta\delta = l_p \Delta\epsilon_p + l_e \Delta\sigma/E$ で表わされる。ここに、 l_e は伸び計で検出される全弾性伸びに対する相当平行部長さで、明らかに試験片の形状のみにより定まり、応力レベルに関係なく一定の長さである。したがって、いまロードセルの出力を Y 軸に、試験片に張ったひずみゲージの出力を X_1 軸 (第 1 ビーム) に入れ、Fig. 11 (b) に示すように、応力 σ と全ひずみ ϵ とのヒステリシスを二現象シンクロスコープ上に描かせ、そのヒステリシスの幅より塑性ひずみレンジ $\Delta\epsilon_p$ を、ひずみゲージのゲージ率によるか、あるいは弾性ひずみ

レンジ $\Delta\sigma/E$ により較正して読む。同時に伸び計の出力を X_2 軸 (第 2 ビーム) に入れ、さきのものと弾性線の傾斜が同じになるように調整して第 2 のヒステリシスを描かせると、 X_2 軸には同じ尺度で δ/l_e が、そのヒステリシス幅には $\Delta\epsilon_{pa} = \Delta\epsilon_p \frac{l_p}{l_e}$ が現われ、 $k = \Delta\epsilon_p / \Delta\epsilon_{pa} = l_e / l_p$ が求まる。応力レンジ $\Delta\sigma$ のレベルを種々に変えて $\Delta\epsilon_p$, $\Delta\epsilon_{pa}$ を求めプロットするとき、ほぼ原点を通る一直線上に並ぶならば、 $k = l_e / l_p$ が $\Delta\sigma$ によりほとんど変化しないことがわかる。このとき伸び計により塑性ひずみレンジを求めるには、まず伸び計により弾性範囲内でヒステリシスを描かせ、その弾性線の傾斜が k/E であるとして尺度を定め、この尺度で塑性ひずみレンジを較正すればよい。後述のような、S20C 材の Fig. 13 に示す試験片に対しては $k = l_e / l_p \approx 2.1$ となった。

塑性ひずみレンジをカウントするには、Fig. 12 (a)

(a) Principle of plastic strain range counting
(b) Electric circuit diagram

Fig. 12. Plastic strain range detecting device.

に示すように応力波形②を微分した③によりトランジスタチョッパを作動させ、塑性ひずみ波形①を③が負になる荷重の減少する期間では接地し、③が正になる荷重の増加する期間だけ零レベルの上ののせて④の波形とし、④を前記のレベルクロッシングカウンタでカウントすればよい。実際には、塑性ひずみ波形は応力の減少のはじめに弾性除荷による停止期間があるので、③を少し遅らせた③'でスイッチングし④'を得るよう

にしたほうが、位相に多少のずれがあっても誤差を生ぜず好都合である。Fig. 12(b) はこの回路を示す。一方向への大きい塑性ひずみがない場合には、塑性ひずみレンジの増加側と減少側とは統計的に等しいと考えてよいので、一方向のみをカウントすればよい。

3 実験結果

Table I, II に示す 19mm ϕ 熱間圧延のままの S20C 棒材より旋盤加工し、04番エメリーペーパーで軸方向に

Table I. Chemical composition of material used.

Designation	C	Mn	Si	P	S
S20C	0.20	0.50	0.25	0.010	0.028

Table II. Mechanical properties of material used.

Designation	Yield point (kg/mm ²)	Tensile strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction in area (%)
S20C	32.1	47.9	31.2	67.4

Fig. 13. Test specimen.

Q=50
Stress wave

Plastic strain wave

Q=3
Stress wave

Plastic strain wave

Q=1
(20~50 c/s)
Stress wave

Plastic strain wave

Fig. 14. Examples of stress and plastic strain waves.

ていねいに仕上げた Fig. 13 に示す 3.5mm ϕ 平滑試験片について、この試験装置で実験した一例を示す。

Fig. 14 は白色ランダム信号発生器の高域および低域ろ波器のしゃ断周波数をそれぞれ 20c/s, 200c/s に設定し、Fig. 2(b) に特性を示す $Q=50, 3, 1$ の3種の1自由度振動系をアナログしたフィルタを通したときの応力波形の一例で、塑性ひずみ波形をともに示す。試験機の特性を含めた全体の周波数応答は Fig. 2(b) に破線で示すようになっている。低域のしゃ断周波数はいずれも 20c/s, (16 db/oct.), $Q=50, Q=3$ のときのピークの周波数は 40c/s, $Q=1$ のときは -3db の帯域幅が 20c/s (16db/oct.)~50c/s (12db/oct.) である。応力波形は帯域幅とともに不規則度を増し、塑性ひずみ波形はより著しく変化する。さらに $Q=50$ のときも含み平均塑性ひずみの漂動が認められる。

疲労試験結果については前述のうち $Q=50$ の場合のみをここに示す。Fig. 15はこのときの応力のレベル

Fig. 15. Distribution curve of stress and plastic strain.

クロッシングのひん度分布、および塑性ひずみレンジの累積ひん度分布の一例で、塑性ひずみレンジは繰返し数とともにかなり変化するが、破断までの全寿命期間にわたる平均がとってある。応力は狭帯域であるから振幅（レンジの半分）および極大値の累積ひん度分布もこれと一致する。図の破線はガウス分布で、レベルクロッシングひん度の2乗平均値 10.2kg/mm^2 の3倍以上までよく一致している。極大値、振幅の2乗平均値は $\sqrt{2} \times 10.2 = 14.4\text{kg/mm}^2$ となる。

一定振幅荷重の場合にも Fig. 16 に示すように、塑性ひずみレンジはかなり大きく変化する。炭素鋼はこのような高繰返し数領域においては、塑性ひずみは最初比較的急に増加し、すなわちはじめに軟化し、後に飽和もしくは少し硬化する傾向があるようで、低繰返し数領域におけるはじめてから硬化する傾向とは異なっている。なお、疲労限度でも塑性ひずみレンジが 0.02%程度に達し、いつまでも残っていることは興味深い。

Fig. 16. Variation of plastic strain range as a function of number of cycles.

まえがきに述べたように、塑性ひずみと疲労破壊の間の関係をまず調べるために、塑性ひずみについて考えることのできる因子は、一定振幅荷重、および狭帯域ランダム荷重の場合には塑性ひずみレンジのみである。低繰返し数領域においては、塑性ひずみレンジについての疲労破壊法則として、一定振幅(一定レンジ)試験の場合にはいわゆる Manson-Coffin の式が広くなりたつことが認められている。筆者らはこれを変形した次式から、

$$D = N \cdot \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_0} \right)^a = 1 \quad (4)$$

$a=2$ に近い値をとる定数

ϵ_0 = 破断延性にほぼ比例する材料定数

疲労損傷は $\Delta \epsilon_p$ の a 乗に比例すると考え、さらにその線形累積を仮定し、塑性ひずみレンジの変動する場合にも、平均塑性ひずみの変動の影響が小さいときには、実験とよく合うことを示した。

そこでこれが高繰返し数領域にも適用されると仮定し、 $F(\Delta \epsilon_p)$ を全寿命間の塑性ひずみレンジの累積ひん度(ただし、片側たとえば増加側のみをとっている)とすれば疲労破壊の条件は、

$$D = \int_0^\infty \left(\frac{\Delta \epsilon_p}{\epsilon_0} \right)^a \left\{ - \frac{dF(\Delta \epsilon_p)}{d\Delta \epsilon_p} \right\} d\Delta \epsilon_p = 1 \quad (5)$$

となる。そこで損傷の重みをつけた塑性ひずみレンジの平均値、すなわち相当塑性ひずみレンジともいうべき、

$$\Delta \epsilon_p^* = \frac{\int_0^\infty \Delta \epsilon_p \left(- \frac{dF}{d\Delta \epsilon_p} \right) d\Delta \epsilon_p}{\int_0^\infty \left(- \frac{dF}{d\Delta \epsilon_p} \right) d\Delta \epsilon_p} \quad (6)$$

を定義し、これに対応して相当破断繰返し数を

$$\tilde{N} = \frac{\int_0^\infty \left(- \frac{dF}{d\Delta \epsilon_p} \right) \Delta \epsilon_p^a d\Delta \epsilon_p}{\Delta \epsilon_p^a} \quad (7)$$

と定義して、両対数線図上にプロットすると

$$\tilde{N} \left(\frac{\Delta \epsilon_p^*}{\epsilon_0} \right)^a = 1 \quad (8)$$

なる直線上にのるはずである。Fig. 17 にその結果を

Fig. 17. $\Delta \epsilon_p$ - $\tilde{N}$ curve of unnotched 0.2% carbon steel specimens.

示す。一定応力振幅試験結果とランダム応力試験結果とは明らかに同一直線上 ($a \approx 1.90$) のっており、上記の仮定がよくなりたつことを示す。なお、低繰返し数領域の試験結果の直線 ($a \approx 1.84$) が少し食い違うのは繰返し速度 (1~5 c/min)、試験片の形状 (つづみ形)、寸法 (6mmφ) など試験条件が著しく異なるためと思われる。

次に、応力と塑性ひずみの関係としては、当然応力レンジと塑性ひずみレンジを考えるべきである。後者は疲労の進行に伴い変化するので、全寿命間における平均的なものとして、各試験片についてそれぞれFig. 15を考え、数段階の応力レンジ $\Delta \sigma$ の値に対し、これと累積ひん度の等しい塑性ひずみレンジを対応させて $\Delta \epsilon_p^*$ とし、応力レベルの異なる 幾本かの試験片についてプロットしたものを、Fig. 18 に白丸で示す。なお、黒丸は各試験片における $\Delta \epsilon_p$ に対応する点である。ばらつきはかなりあるが応力レベルにかかわらずほぼ一直線上にあるとみられ、

Fig. 18. Relation between stress range and plastic strain range.

$$\Delta \epsilon_p^* = \left(\frac{\Delta \sigma}{\Delta \sigma_0^*} \right)^m, \quad m \approx 6 \quad (9)$$

となる。図中+印は一定応力振幅のときの $\Delta \sigma$ と $\Delta \epsilon_p$ の関係で、傾斜が少しゆるく $m \approx 9$ となり一致しないので、ランダム応力試験の場合の応力-塑性ひずみの関係を一定応力振幅試験からただちに求めることはで

きないように思われる。これは両者で軟化、硬化の状況が異なるためと思われる。

4 結 言

ランダム荷重の下における疲労の基礎的な研究を行なうため、小形平滑試験片の引張圧縮試験の可能な動電形ランダム疲労試験装置を試作し、一応所期の目的を達したので、実験の一例とともに報告した。0.2%炭素鋼 40c/s の狭帯域ランダム荷重試験を行ない、次の結果を得た。塑性ひずみレンジの a 乗 ($a \approx 1.9$) に比例する疲労損傷が線形に累積するとの仮定がなりたち、全寿命間の平均的な関係として塑性ひずみレンジと応力レンジの間に $m \approx 6$ 乗のべき関数関係が、応力レベルに関せずほぼなりたつことがわかった。ただし、一定応力振幅の場合とは m の値が異なる。

しかし、これらの結果はむしろ最も単純な場合と思われる、広帯域ランダム荷重の場合、繰返し速度、材料の異なった場合などについては、なお多くの複雑な二次的効果がみられるが、これらについては別の機会に譲る。

これらの試験装置の開発にあたって、ランダム信号発生器は前述のとおり、すべて電子工学教室宮脇一男教授、杉山暁助手のお世話になり、試験機本体の製作には長浜製作所、大阪変圧器株式会社、日本橋梁株式会社、川崎重工業株式会社の協力をいただいた。なお当時大学院学生であった今村吉徳君、学部学生であっ

た和田晴雄、堤将暢、光川鴻之祐、橋本義和の諸君の助力を受けた。ここに深く謝意を表する。

(昭和38年5月10日 日本材料学会第12期総会講演会, 昭和39年5月14日 日本材料学会第13期総会講演会, 昭和42年9月22日 実働荷重における疲労に関するシンポジウムにて講演)

参 考 文 献

- 1) Head, A.H., and F.H. Hooke, Int. Conf. on Fatigue of Metals, p. 301 (1956).
- 2) Kowalewski, J., Proc. of a Symp. on Full-scale Fatigue Testing of Aircraft Structures, p. 60 (1959).
- 3) Fralich, R.W., NASA Memo, 4-12-59L p. 1 (1959).
- 4) Leybold, H.A., and E.C. Naumann, ASTM, **63**, 717 (1963).
- 5) 菊川 真ほか, 日本材料学会第12期総会講演会前刷, p.21 (1963); 菊川 真ほか, 日本材料学会第13期総会講演会前刷, p.13 (1964) ほか.
- 6) 菊川 真, 城野政弘, 実働荷重における疲労に関するシンポジウム前刷, p.55 (1967).
- 7) 菊川 真ほか, 材料, **13**, 631 (1964).
- 8) 宮脇一男, 杉山 暁, 電気四学会連合大会講演論文集, p.253 (1963).
- 9) 菊川 真ほか, 機械学会誌, **70**, 1 495 (1967).