超音波振動を金属の実用疲労試験に利用 することの可能性について*

菅 野 猛** 栗 谷 丈 夫** 吉 川 明 静**

Takeshi Sugeno, Jobu Awatani and Akiyoshi Yoshikawa: On the Possibility of Use of Ultrasonic Vibration in Engineering Fatigue Tests of Metals (Fatigue of Metals by Ultrasonic Vibration, 1st Report.) The method of the use of ultrasonic vibration for quick results in fatigue tests has been developed. The authors built the apparatus by using a nickel magnetostriction transducer operated at 18.6 kC/s and an exponential horn as a focusing device. It causes the stress amplitude of 30 kg/mm² in a mild steel rod of 3.8mm dia. This is the report on the characteristics of fatigue testing by this apparatus.

(Received March 5, 1959)

I. 緒 言

従来の疲労試験機の繰返速さは 100~6,000 c/m 程度で、耐久限を求めるのに必要な 10⁷ 回の繰返回数に達するには数日以上の日時を要する。繰返速さを速くして試験を迅速に行うという見地から、超音波振動を利用して実際に金属の疲労試験が行われたのは最近のことで、1956 年 Mason⁽¹⁾ がチタン酸バリウム振動子を、また 1957 年には Neppiras⁽²⁾ が Ni 磁歪振動子を用いて繰返速さ 18 kC/s 程度の疲労試験装置を試作し、超音波振動による金属の疲労試験が可能であることを示した。

わが国においては 1957 年著者の 1 人⁽³⁾ が Ni 磁歪振動

子を用い、Neppiras よりもさらに大きい応力振巾が得られる装置を試作し、真鍮、軟鋼の S-N 曲線を求めている。

我々はこのような超音波疲労試験装置の実用化と超音波疲労のように繰返速さが非常に速い場合にみられる金属塑性的な諸特性に興味をもち、さきに試作したものと略々同様な 18.6 kC/s の装置を組立てこの方面の研究を進めているが、ここではこの装置の紹介とその特性をみるために行つた二三の予備的実験の結果、およびそれから推察される超音波疲労試験法の得失について述べる。

II. 装 置

1. 原 理

通常 Ni 磁歪振動子で得られる歪振巾は 10⁻⁵ 程度で、これを疲労試験に必要な 10⁻³ 程度にするためには振動子端面の変位振巾を数十倍拡大しなければならない。この目的には超音波加工機などに用いられているような指数函数型ホーンを用いた。すなわち Fig.1 に示すように振動子の基本振動に丁度共振する長さをもつ指数函数型ホーンお

** 大阪大学産業科学研究所

* 1958 年 10 月本会名古屋大会に発表；超音波振動による金属の疲労（第 1 報）

(1) W.P.Mason: J. Acoust. Soc. Amer., **18**(1956), 1207.

(2) E.A.Neppiras: Proc. Phys. Soc., **B70**(1957), 393.

(3) 栗谷、宮本：1958 年 1 月 電気通信学会に講演

よび試験片を振動子の上に接着すると、振動の振巾はホーンの下端と上端の直径の比に拡大されて試験片に伝わり、

Fig.1 Schematic sketch of the apparatus.

これに引張 - 圧縮の繰返応力を生ぜしめる。試験片は振動に共振する長さをもつからその形状が単純円筒形の場合には試験片の変位振巾 η 、および歪振巾 ε の軸方向の分布は Fig.1 の記号を用いると

$$\eta = A \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (1)$$

$$\varepsilon = \frac{\partial \eta}{\partial x} = \frac{\pi A}{l} \cos\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (2)$$

の如く表わされ、また応力振巾 σ は ε に動弾性率 E をかけて

$$\sigma = E \varepsilon = \frac{\pi A E}{l} \cos\left(\frac{\pi x}{l}\right) \quad (3)$$

の形で表わされる。従つて応力振巾は試験片の両端で 0、中央で最大になる。

2. 装置とその動作

Photo.1 は装置の振動部分の写真である。Ni 磁歪振動子は最大約 300 W の高周波入力によつて駆動される。ホーンは振巾拡大率を大きくするため 2 段にし、それぞれを振動子の共振周波数 18.6 kC/s で正しく半波長の長さをもつように仕上げてある。この上に同じく半波長の長さに仕上げた試験片をその軸がホーンの軸と一致するように取りつける。ホーンおよび試験片の長さが正しく調製されていれば、ホーンと試験片の接着部分は上述の如く理論的には応力振巾は 0 で力が全然働かないはずであるが、実際には試験片の長さの調製が不完全であつたり試験の途中で疲労によつて動弾性率が変わるため共振がずれ、接着部分に小さい力が働くことが考えられる。我々は取扱いの簡便さから、試験片の取付けには半田を用いているが、試験中に試験片がはずれるとか、接着が不完全になつたため変位振巾が変わるというような事態はおきなかつたので、この方法を採用した。

試験片の応力振巾は各部の変位を読取顕微鏡で測定してその変位勾配から求められるが、この実験では試験片は円

Photo.1 Vibrating arrangement and measuring device of displacement.

筒形のものを用いている故、試験片先端の変位のみを測定して (1), (3) 式より計算で応力振巾を求めることが出来る。実験に使用した読取顕微鏡ではその最小目盛が 2.5μ で、これは試験片中央での応力振巾に直して軟鋼および銅の場合それぞれ 1.2 kg/mm^2 および 1.0 kg/mm^2 に相当する。現在の装置では $3.8 \text{ mm}\phi$ 円筒形軟鋼試験片に最大約 30 kg/mm^2 の応力振巾を与えることが出来る。応力振巾の加減は振動子に入る高周波入力を増減することによつて簡単に行いうる。繰返応力が大きい場合には振動子、ホーンおよび試験片にかなりの温度上昇がみられたので振動子とホーンは水槽中に入れ、試験片は上部から流水をかけて冷却した。

III. 試料および実験結果

1. 試料の調製

試験片は低炭素鋼および電気銅の線引材より整形した丸棒で、その寸法はそれぞれ $3.8 \text{ mm}\phi \times 137 \text{ mm}$ 、および $3.0 \text{ mm}\phi \times 98 \text{ mm}$ である。

疲労試験結果には表面の状態が大きい影響を与えるから、試験片は線引材を No.03 までペーパー研磨して表面の疵を除き、真空焼鈍後電解研磨をした。

2. 試験片軸方向の変位分布

試験片は円筒状であることから、その変位分布が正弦的であることが予想される。実測の結果予想の正しいことが証明された。Fig.2 は低炭素鋼について測定した結果である。図の実線は正弦曲線で測定値はよくこの上についでいる。これから試験片先端の変位のみを測定して、それからかなり正確に各部の応力振巾を求めうるということがわかる。以下の実験での応力振巾は皆この方法で求めたものである。

3. 銅および低炭素鋼の S-N 曲線

繰返速さの速い超音波疲労試験においては如何なる S-N

曲線がえられるか、純度 99.9% 電気銅 (400° 焼鈍) および 0.1% C 炭素鋼 (920° 焼準, 粒度 ASTM 6~7) に

Fig.2 Displacement distribution along the axis of low carbon steel.

について求めた結果をそれぞれ Fig.3 および Fig.4 に示す。図中に示した応力振巾は試験片中央の最大値で、殆どこの試験片は略々この最大位置で破断した。若干はこれより少しずれたところで破断したが、これらは破断面の観察から大抵介在物、疵などが原因と考えられるものであつたので図には採用していない。

Fig.3 S-N curve of pure copper. 験した場合 1.7×

Fig.4 S-N curve of low carbon steel.

10^9 回の繰返回数に対してもなお破断しないことから、試験した低炭素鋼では明らかに疲労限が存在することがわかる。ここに得られた疲労限は通常の繰返速さの遅い場合の値とあまり異ならないようであるが、疲労限に対応する繰返回数は通常の試験のそれよりも一桁ほど大きい。

IV. 考 察

現在使用している読取顕微鏡で応力測定を行う場合、変位振巾の読取りに基づく誤差は比較的小さく ± 0.2 kg/mm² 程度であるが、この他に破断点の中央からのずれ、試験片の取付け方などによる誤差を加えて ± 0.5 kg/mm² 程度の誤差が伴うと考えられる。試験片の形状については

この研究に用いた円筒形のものと Neppiras らが用いたテーパ状に中央部を細く削つたものとの得失は試験片中央に生ずる応力の大きさという点では後者が優っているが、応力測定の簡便さ、確度のよさという点では前者が一段と秀れているといえよう。

さて炭素鋼の S-N 曲線で疲労限に対応する繰返回数が繰返速さの遅い場合の結果に比べて一桁ほど大きいという現象については、いまの実験の範囲ではこれをよく説明することが出来ないが、繰返速さが速くなると S-N 曲線が寿命の長い側へ移動するという事は銅、アルミ合金でも二三の研究者⁽⁴⁾⁽⁵⁾によつて見出されており、繰返速さの影響として興味ある事実である。

試験片における温度上昇は低炭素鋼で水冷しない場合、200° 以上にもなるが、水冷すると温度上昇が殆んどないことが示差熱電対による測定で確認された。従つて巨視的な温度上昇は水冷で防げることがわかつたが、その反面流水によるエロージョンがおこなることが懸念される。試験した低炭素鋼、および銅の場合共に顕微鏡観察では試料表面にエロージョンがおきた形跡は認められなかつた。試験時間が通常 1 hr までの短いことと考へ合せ、もしおきていてもエロージョンが疲労強度に及ぼす影響は極めて小さいと思われるが、この点についてはさらに検討を進めている。

V. 結 語

試作した超音波疲労試験装置の性能と、その試験法を従来の疲労試験機によるものと比較した場合の得失を列挙すると、

(1) 試作した装置では繰返速さは 18.6 kC/s で従来の疲労試験機に比し数百倍も速く、 10^7 回の繰返しを 10min 以内に完了出来る。

(2) この装置で 3.8 mmφ の円筒形軟鋼試験片に最大 30 kg/mm² の応力振巾を与えることが出来る。

(3) 応力振巾が軸方向に正弦的に変つているため 1 本の試験片で種々の応力振巾で疲労させた結果がえられる。

(4) 温度上昇を防ぐため水冷を行わねばならないが、このため生ずるエロージョンはとくに長時間に亘る試験を除いて通常の疲労試験では考慮する必要はない。

この他応力振巾を変えるには振動子を駆動している電気入力を加減するだけの簡単な操作で行うことが出来、さらにバックリングを起さずに引張-圧縮応力が繰返し加えられる点も大きな特徴である。

なお、本研究は昭和 33 年度文部省科学試験研究補助金の補助を受けたことを記しお礼申し上げます。

(4) G. Vidal, F. Girard et P. Lanusse: Rev. Mét., 55(1958), 613.

(5) A. K. Head: J. Phys. Soc. Japan, 11(1956), 468.