超音波疲労による金属材料の機械的性質の変化*

小金井 宏** 田中 哲志** 桜井 忠一**

Changes in Mechanical Properties of Ultrasonically Fatigued Metals

by

Hiroshi KOGANEI, Satoshi TANAKA and Tadakazu SAKURAI

(Faculty of Engineering, Kyushu Industrial University, Fukuoka)

The changes in mechanical properties of carbon steel fatigued ultrasonically at 17 kHz have been investigated. The results were compared with those fatigued by the rotary bending test at 3 000 rpm.

The following conclusions are obtained :

(1) The fatigue life of carbon steel cycled at 17 kHz is longer than that of the same material fatigued at 3 000 rpm. This is more pronounced in annealed (An.) materials than in low-temperature quenching (LTQ) ones.

(2) The variations of hardness Hv and residual stress σ_i during the fatigue test are smaller at 17 kHz than at 3 000 rpm fatigue.

(3) The variations of both Hv and σ_i for S10C (0.1%C) during the fatigue test at 17 kHz are slightly smaller than those for S45C (0.42%C). In the case of 3 000 rpm fatigue, however, these variations values for S10C are fairly larger than those for S45C.

(4) In both 17 kHz and 3 000 rpm tests, the amounts of change in Hv , σ_i and E' become larger as the stress amplitude increases.

(5) In the fatigue process at 3 000 rpm, the amount of change in Hv of LTQ specimen is larger than that in Hv of An. specimen. However, there is no significant difference between them in the process of 17 kHz fatigue.

(6) The number of slip lines produced on the specimen surface fatigued at 17 kHz is far fewer than that at 3 000 rpm, especially in LTQ materials. However, the number of cracks is not so different between them. It is confirmed that those characteristics may influence the hardness and Young's modulus.

(7) The relationship between the hardness and the residual stress can be expressed as follows:

$$Hv = Hv_0 + e^{k\sigma_i}$$

where k is a constant which depends upon the kind of materials, working conditions and fatigue testing conditions. This equation, however, is not applicable to the later stage of the fatigue test nor to the quenched materials.

(8) The relationship between the residual stress and Young's modulus can be expressed as follows:

$$\sigma_i = K_1 E_s E_{st} / \Delta E$$

($\sigma_i > 0.5 \text{ kg/mm}^2$ in carbon steel)

where $\Delta E = E_{st} - E_i$; E_{st} being Young's modulus in saturation magnetization and E_i being Young's modulus in non-magnetization.

(Received Sep. 9, 1974)

1 緒 言

金属材料が超音波領域の高周波疲労を受けると、その繰返し応力の大きさによっては顕著な機械的性質の変化を生じ、ついに破損、破壊にいたると考えられる。疲労過程における転位数の増加は降伏点やかたさを上昇させるが、同時に結晶格子の結合を弱め、ヤング率

の低下をもたらす。低周波領域では、この種の研究は^{1)~3)}かなり行なわれているが、超音波振動疲労については案外知られていない。また、強磁性体である炭素鋼においては、疲労によって生ずる残留応力が ΔE 効果⁴⁾に何らかの変化を与えているかも知れない。さらにまた、この残留応力と表面かたさとの相互関係については、⁵⁾⁶⁾すでに古くから検討され資料も多いが、超音波振動疲労についての研究はあまり見受けないので、ここでは

* 原稿受理 昭和49年9月9日

** 正 会 員 九州産業大学工学部 福岡市東区松香台

4E 効果の関係とともにこれらについての実験的検討を試みている。なお, 17 kHz の超音波疲労試験と並行して, 3 000 rpm の回転曲げ疲労試験を行ない, それらの結果を相互に比較検討し, さらに, 表面組織の変化についての観察をも加えて, 上記との関連性を考察している。

供試材としては, 4E 効果を調べるために強磁性体である炭素鋼を選び, かつ含有炭素量によるかたさ, ヤング率および残留応力の依存性を調べる必要から S45C と S10C の焼なまし材 (An. 材) を用いる。さらに, 低炭素鋼においては残留応力等の影響のほかに, 析出時効による材質の強化の影響が大きいものと考えたので, 低温焼入時効材 (LTQ 材) も使用する。さらに, 疲労過程での音速とヤング率の類似性についても簡単に報告している。

2 試験片および実験方法

供試材の化学成分を Table I に, その機械的性質を Table II に示す。Table II に An. 1 と記したものは旋削 (荒削り) 後, S45C 材は 840℃, S10C 材は 900℃で1時間の焼なましを行ない, かつ, 旋削, 研削, パフ研摩を施したもので, An. 2 は研削後, 温度と時間を上記と同じくしてさらに真空焼なましを行ない軽くパフ研摩を施したものである。S10C の LTQ

Table I. Chemical composition (Wt %).

Material	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
S45C	0.42	0.25	0.16	0.015	0.015	0.04	0.01	0.01
S10C	0.10	0.28	0.31	0.021	0.031	—	—	—

Table II. Mechanical properties.

Material	Yield point σ_s (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	True fracture stress σ_T (kg/mm ²)	Elongation δ (%)	Reduction of area ϕ (%)
S45C (An. 1)	35.4	64.4	128.8	31.0	50.0
S45C (An. 2)	34.8	61.6	128.3	32.0	48.0
S10C (An. 1)	18.8	34.0	66.3	38.0	60.0
S10C (An. 2)	16.1	33.8	63.8	32.2	65.2
S10C (LTQ)	20.4	45.0	84.3	25.0	56.0

Fig. 1. Dimension of specimen.

材は素材を焼なまし後 700℃で 100 分間加熱し, -10℃塩水中にて急冷した後, 旋削, 研削, パフ研摩を行なったものである。検鏡用試験片はさらに表面の一部を 3% Nital で腐食した。

形状寸法は Fig. 1 に示すように, 試験片はその諸測定に必要な試験部分が直径 6 mm の平滑丸棒で, 超音波疲労試験機の振幅拡大用ホーン先端に小ねじを用いて取り付けられるようになっている。非接触式振幅測定器により, 試験片の 6 mm 部先端振幅 ξ_0 を読みとり, 次の式により任意の x 点における応力振幅を決定する。すなわち,

$$\sigma = \frac{\pi E_t \xi_0}{2\bar{x}} \cos \frac{\pi x}{2\bar{x}} \quad (1)$$

ここに $\bar{x}$ は材料中の音波長の 1/4 で, 応力分布の形は Fig. 1 中に示す。回転曲げ疲労試験片は直径 6 mm, 長さ 160 mm の平滑丸棒で, 加工法は超音波疲労試験片に準ずるものである。

疲労試験には最大出力 2 kW の超音波疲労試験機を用い, 試料の共振点約 17 kHz において使用した。試験中の試験片が疲労過程でわずかもヤング率を変えれば共振周波数もかわるので, 自動追尾装置を内蔵させ常に共振状態にあるように, 超音波発生機は設計されている。振動による試験片の発生熱の冷却には水 (水道水と地下水の混合水で pH6.8, 塩素イオン 173 PPM, KMnO₄ 消費量 24 PPM, 鉄分 0, 硬度 CaCO₃ 310 PPM のもの) を 17°±2℃で用いた。振動による疲労進行中の機械的性質の変化を調べるために, 破断予定までを幾つかの段階にわけ, 各段階では試験片を試験機から取りはずして, 1 本の試験片について残留応力 σ_r , ならびにヤング率 E_t と飽和磁化状態におけるヤング率 E_{st} を測定し, つぎにかたさ Hv を計測した。

ヤング率 E_t の測定にあたっては 50 ton ならびに 2 ton のアムスラー形万能試験機を用いた。試験片の測定点 (M. P.) ①②の両側に 1 mm の耐磁性ひずみ計を (計 4 個) 取りつけてひずみを測定し, 軸方向の公称応力と公称ひずみを用い最小自乗法によりヤング率を求めたものである。試料は, さらに磁化コイル中で飽和磁化させ, E_t と同じようにひずみを求め, 飽和磁化ヤング率 E_{st} を得る。回転曲げ疲労試験片の場合は一部マルテンズの伸び計を用いた。

残留応力測定には東芝製卓上形 X 線応力測定装置および理学電気製 Strain Flex を使用し, $\sin^2\psi$ 法または $\theta-2\theta$ 法により試料表面の軸方向の残留応力を求めた。測定点は, M. P. ①②③の 3 箇所とし, その両側を測定した。回転曲げ試験片では 7 箇所の両側を測定して平均したものである。

かたさ試験には微小ビッカースかたさ試験機 (1 kg)

を 0.5 kg の負荷で使用した。はじめ 0.1 kg 負荷で用いたのであるが、バラツキが大きく測定値変化の有為性を決定するには多くのデータが必要となるため、他の測定に大きな影響（1%以上）を与えない範囲で 0.5 kg を選んだ。かたさ値は軸方向に12点、円周方向に4箇所計48箇所の測定を行なって得たのであるが、他の2測定（ヤング率、残留応力）も同一試験片について行なう場合は測定箇所は軸方向に5箇所（円周方向4箇所）とし、さらに本論文のかたさ変化グラフは明りょうを期するため後述のように、Fig.1の①②③の3箇所の各4点平均値について、または①のみ、あるいは①と②のみを表示するにとどめた。回転曲げの場合の測定箇所の数は、ほぼ、これに準ずる。

回転曲げ疲労試験には 10 kg-m の小野式回転曲げ疲労試験機を 3 000 rpm で使用した。

3 実験結果および考察

Fig. 2 は各供試材の S-N 線図である。超音波振動疲労では水冷による腐食疲労が伴うため明りょうな耐久限度が現われない。粟谷、片桐⁹⁾や菊川¹⁰⁾も本実験と同じような報告をしている。そこで回転曲げ疲労の耐久限度 σ_w と比較する際には便宜上繰返し数 2×10^8 回の疲労強度をもって、同じ記号 σ_w を用い、実験結果の応力振幅を表現するものとする。S-N 線図より主な特徴を述べると、

Fig. 2. S-N curves of carbon steel (S10C and S45C).

(1) 焼なまし材において、回転曲げ疲労に対する超音波疲労の繰返し寿命、疲労強度の著しい増加はすでに報告されているものとほぼ同傾向を示した。

(2) 回転曲げ疲労では An. 材に対し LTQ 材の疲労強度が著しく増しているのに対し、超音波疲労ではあまり増大していない。これは時効促進作用の繰返し速度依存性と試験時間の差に基づくものと考えられる。

3・1 表面かたさと残留応力

かたさの測定バラツキはかなり大きく、その標準偏差は疲労初期が H_v かたさ値 2.0、疲労末期では約 3.2

であった。また繰返し数とともに変動するかたさ値の傾向のバラツキも、それぞれの試験片の疲労寿命のバラツキと同様に大きい。一つの応力振幅に対して 5 本の同じ供試材の実験データから最も共通点の多い試験片をパターンとして選び出し、その実験結果を Figs. 3, 4 にそれぞれ応力振幅をパラメータとし、表面かたさ値を振動の繰返し数に対してプロットしたものを表示する。これより、疲労が進むにつれかたさ値は増大し、やがて極大値に達するか、飽和することがわかる。すなわち、図中、疲労末期の極大値付近で点線を示したように、試料によってはかたさの下がらないものもあった。Fig. 3 の S45C, An. 2 材の実験結果から、 σ_w 以上の応力振幅では応力最大（測定点 M. P. ①）付近のかたさ値がわずかながら上昇しており、②の点がこれにつぎ、応力の低い先端近傍の③では有意差はほとんどみとめられない。Fig. 5 に示す同材の回転曲げ疲労のかたさ変化量に対して、超音波材の非常に少ないのは後述のすべり線発生量のきわめて少ないことに起因するものと考えられる。他の材料もふくめて回転曲げ疲労材によるかたさ変化量については筆者も過去において述べているが¹²⁾、これと同じような結果を得ており、すべり線については粟谷、片桐⁹⁾も本実験と同じような結果を報告している。ただし、回転曲げでは超音波振動の場合と違い、炭素量が少なくなるに従い、すべり線が多くなり、かたさ値の変化量は大きくなるのが特徴的であった。超音波疲労試験において炭素量の少ない S10C, An. 2 材では、Fig. 4 のように、S45C よりさらに変化量は小さく有意差をわずかにみとめる程度であることがわかるが、これはすべり線のフェライト部分に現われる量が少ないばかりでなく、S45C では転位の固着の多くなるパーライトと残留応力の増加が大きく影響して、ますます S10C との間に差を作るものと考えられる。S10C の LTQ 材（時効材）については幾分かたさの上昇がみられるが、回転曲げの場合

Fig. 3. Relation between hardness H_v and number of stress cycles N (S45C, An. 2, 17 kHz).

合のような顕著な効果(加藤¹³⁾や筆者らの報告にある)はあげていない。これは $S-N$ 線図の説明と同じように時効促進作用の繰返し速度依存性に基づくものと考えられる。

残留応力の測定値もバラツキは大きく(偏差値 1.5 kg/mm^2), 疲労過程でみられる試料相互のバラツキはさらに大きい, かたさと同じパターンを選び, その結果を有意差の認められる応力振幅領域のみについ

Fig. 4. Relation between hardness H_v and number of stress cycles N (S10C, An.2 and LTQ, 17 kHz).

Fig. 5. Relation between hardness H_v and number of stress cycles N (S45C, An. 1, 3000 rpm).

Fig. 6. Relation between surface residual stress and number of stress cycles N (S45C, An.2, 17 kHz).

Fig. 7. Relation between surface residual stress σ_i and number of stress cycles N (S10C, LTQ and An.2, 17 kHz).

Fig. 8. Relation between surface residual stress σ_i and number of stress cycles N (S45C, An.1, 3000 rpm).

Fig. 9. Relation between σ_i and ΔH_v (0.5).

て(③を除いて), Figs. 6~8に示す。疲労の進行に伴い増大して極大値に達すると下降をはじめ, やがて破断にいたることがわかる。図中の残留応力値は圧縮残留応力を示すものである。さて, かたさと残留応力の関係を調べるために, An. 材の真空焼なまし完了直後のかたさ H_{v0} と任意疲労過程でのかたさ H_v との差 ΔH_v を横軸に, 縦軸には試料表面の残留応力を表わし, 実験値をプロットしたものが Fig.9 である。大きなひらきのある疲労末期のかたさ値を除いて 4%

法で整理すると

$$\Delta H v = e^{0.32 \sigma_s} \quad (2)$$

が得られ、回転曲げ疲労では一層よく適合し、

$$\Delta H v = e^{0.26 \sigma_s} \quad (3)$$

を得る。LTQ 材については Fig. 4 と Fig. 7 よりわかるように、このような実験式は一般に適用できない。

3・2 ヤング率と残留応力

応力の繰返し数とヤング率の変化に関する実験結果を Figs. 10~12 に示す。超音波疲労の場合と回転曲げ疲労の場合との差はほとんどないようである。図中実線で示したものが一般の（消磁状態における）ヤング率 E_t の変化曲線で、1点鎖線で表わしたものが飽和磁化状態におけるヤング率 E_{st} の変化曲線である。いずれも破断点 B.P. 近傍でヤング率の急激な減少がみられる。この時点では、最大応力点①付近で、いくつかの微視的き裂から巨視的なき裂へと発達するのが観察された。しかしながら極小値をへて増大し、やがて極大値に達した後の下降線の緩急は試料によりまち

Fig. 10. Relation between Young's modulus E_t and number of stress cycles N (S45C, An. 2, 17 kHz).

Fig. 11. Relation between Young's modulus E_t and number of stress cycles N (S10C, LTQ and An. 2, 17 kHz).

Fig. 12. Relation between Young's modulus E_t and number of stress cycles N (S45C, An. 1, 3000 rpm).

Fig. 13. Relation between ΔE effect and $E_t E_{st} / \sigma_t$.

Fig. 14. Changes in sound velocity during the fatigue test at 3000 rpm (S45C, An. 2).

まちである。

また、筆者らが別に測定した回転曲げ疲労試験をうけた試料の繰返し数に対する音速 (2.25 MHz) の変化を表わす曲線が、ヤング率の変化曲線とよく類似した形をもっているのを、Fig. 14 にかかげておく。試料中の音速 v (cm/s) とヤング率 (dyne/cm²) ならびに

試料密度 $\rho(\text{g/cm}^3)$ の関係が

$$v = (E/\rho)^{1/2}$$

で表わされるように, E とともに v が変化することはよく理解される.

つぎに, $\Delta E (= E_{st} - E_t)$ 効果と試料表面の残留応力 σ_i との関係について調べると, Fig. 13 でわかるように, ΔE と $E_t E_{st} / \sigma_i$ との間には一定の比例関係が成り立つことが明らかとなる. すなわち, 今回の実験から, 炭素鋼については, その種類と疲労試験の種類に関係なく

$$\frac{\Delta E}{E_t} = K_1 \frac{E_{st}}{\sigma_i} = -4.44 \times 10^{-6} \frac{E_{st}}{\sigma_i} \quad (4)$$

なる実験式を得る. K_1 の値は実験値から最小自乗法により求めたものである. ただし, ΔE は有限の値で $\sigma_i = 0$ では成立せずに, $\sigma_i > 0.5 \text{ kg/mm}^2$ の範囲で成立する.

3・3 表面組織の変化

Fig. 15 (a)~(c)は S10C, LTQ 材の疲労破断近傍における光学顕微鏡の写真であって, き裂発生とその進展を示す. すべり線を伴わずに直接き裂の発生発達するのが特徴である. Fig. 15 (d)は S10C, An. 1 材の場合で, き裂周辺の凹凸がはげしく光の乱反射によって太くみえるのがわかる. すべり線がほとんど存在しない場合もあれば, 小さなすべり線がき裂線にそってみとめられるものもある. これらについては, 栗谷, 片桐らも本実験と同じような結果 (LTQ 材を除く) を報告している⁹⁾. また, き裂の発生時期は前述のヤング率測定値の極大値に現われることが多いが, まれにはかなり早い時期に発生するものもある. 回転曲げ疲労では一般に知られるように, 疲労が進むにつれ Fig. 15 (e)の S45C, An. 1 材のように, フェライト中に

Fig. 15. (a) 17 kHz, S10C (LTQ), $\sigma=21 \text{ kg/mm}^2$, $N=5.0 \times 10^6$.
 (b) 17 kHz, S10C (LTQ), $\sigma=21 \text{ kg/mm}^2$, $N=1.5 \times 10^7$.
 (c) 17 kHz, S10C (LTQ), $\sigma=21 \text{ kg/mm}^2$, $N=3.5 \times 10^7$.
 (d) 17 kHz, S10C (An. 1), $\sigma=21 \text{ kg/mm}^2$, $N=1.0 \times 10^7$.
 (e) 3000 rpm, S45C (An. 1), $\sigma=40 \text{ kg/mm}^2$, $N=12700$.

Changes in surface appearance (optical microscope observation).

Fig. 16. (a) 17 kHz, S10C (LTQ), $\sigma=21 \text{ kg/mm}^2$, $N=1.0 \times 10^7$.
 (b) 3 000 rpm, S45C (An.1), $\sigma=35.4 \text{ kg/mm}^2$, $N=2.0 \times 10^4$.
 Changes in surface appearance (electron microscope observation).

は大きく発達したすべり線が多数観察される。このすべり線の発生はかなり早く現われ、かたさの上昇とともに増大している。Fig. 16 はレプリカ法による電子顕微鏡写真で(a)は超音波疲労による LTQ 材の粒界から粒内の欠陥に向かって走るき裂であり、(b)は回転曲げ疲労のすべり線で、ときたま、このように Extrusion ならびに Intrusion 的なものが観察されることがあった(炭素鋼では一般に発生しないといわれている)。

4 結 言

筆者らは超音波振動疲労を受ける炭素鋼の種類(S 45 C, S10 C)や熱処理(An., LTQ)によってかわる S-N 線図の特徴をとらえ、繰返し数の増加に伴って変化する試料表面のかたさと残留応力ならびにヤング率や $4E$ 効果の実験値を求め、相互の関係を考察し、かつ、すべり線やき裂の発生状況と一緒に検討して研究をすすめた。その結果を要約すると次のようになる。

(1) 超音波振動疲労を受ける An. 材の疲労強度と疲労寿命は回転曲げ疲労の An. 材より著しく大きい。超音波疲労を受ける LTQ 材の An. 材に対する疲労強度の増加量は回転曲げの場合に比較して、あまり大きくはない。これは LTQ 材にすべり線がほとんど現われないことや残留応力の解放が寄与していると思う。

(2) 超音波の疲労過程におけるかたさと残留応力の変化量は回転曲げ疲労の場合よりはるかに小さい。

(3) 含有炭素量の減少に伴いかたさと残留応力の変化量がわずかに小さくなっているが、回転曲げでは逆にかかなり大きくなっている。

(4) かたさ、残留応力、ヤング率の変化量は応力振幅の大きいものほど大である。そして、疲労初期から破断にいたるまでの変化過程にはそれぞれ定まった形があり(パラッキは大きい)、かたさでは極大値に達した後やがて破断し、残留応力は極大値をへて下降しやがて破断するのに対し、ヤング率では極小値をへて増大し、やがて極大値に達すると下降をはじめ破断

にいたる。

(5) 超音波振動疲労におけるすべり線の発生数は回転曲げ疲労におけるすべり線の発生数よりはるかに少なく、特に LTQ 材においては皆無といってもよい。これらの現象はかたさやヤング率の変化に対して大きく影響している。すなわち、回転曲げ疲労では、LTQ 材はかたさが大きく上昇しているのに対し、An. 材は小さく、ヤング率はともに最後に大きく減少している。

さて、次の諸点(6), (7)では 17kHz も 3 000 rpm の場合も共通した関係を有する。

(6) かたさと残留応力との間には、確率論的に、疲労末期をのぞいて

$$\Delta H v = e^{k\sigma_i}$$

なる関係が成り立つ。ただし、 k は材料の種類や加工状態ならびに疲労試験の種類によって異なる。(ただし、焼入材には適応されない。)

(7) 全疲労過程において、ヤング率と残留応力との間には、 $\sigma_i > 0.5 \text{ kg/mm}^2$ の範囲で、次式の関係が成立する。

$$\sigma_i = K_1 E_i E_{st} / 4E$$

終わりにのぞみ、本研究に対し有益なご助言をいただいた九州大学江口教授に感謝の意を表する。また、この実験に終始協力を惜しまなかった10数名の学生諸君や研究生に対し感謝の意を表する。

(昭和49年5月22日 日本材料学会第23期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) Yokobori, T., Journ. Phys. Soc. Japan, V. 6, p. 81 (1951).
- 2) Davies, R. B., J. Y. Mann, and D. S. Kemsley, Proc. Intern. Conference on Fatigue of Metals, 1956, 10-14th Sep. p. 551 (1956) London
- 3) Lazan, B., and T. Wu, Proc. ASTM, V. 51, p. 649 (1951).
- 4) 近角裕信著, 強磁性体の物理, 309 (1966) 裳華房
- 5) 平 修二, 村上裕則, 金属学会誌, 23, 603 (1959).

- 6) 平 修二, 北野練造, 材料試験, **7**, 552 (1958).
- 7) 桜井忠一, 川崎 正, 北 幸純, 材料試験, **4**, 367 (1955).
- 8) 桜井忠一, 小金井宏, 田中哲志, 日本機械学会講演論文集, 738—1 (1972).
- 9) 栗谷丈夫, 片桐一宗, 日本機械学会論文集, **34**, 261 (1968).
- 10) 菊川 真, 大路清嗣, 小倉敬二, 日本機械学会論文集, **32**, 235 (1966).
- 11) 菅野 猛, 栗谷丈夫, 吉川明静, 金属学会誌, **23**, 9 (1958).
- 12) 小金井宏, 日本機械学会講演論文集, 720—9 (1972).
- 13) 加藤容三, 広瀬素尚, 日本材料強度学会誌, **5**, 1(1970).
- 14) 桜井忠一, 小金井宏, 田中哲志, 日本機械学会講演論文集, 738—1 (1973).