技術資料

疲労損傷の非破壊的診断と残存寿命予測法*

尾野 英夫**, 仁瓶 寛太**,
吉田 昌平**, 堀川 武**

Non-Destructive Diagnosis of Fatigue Damage and Prediction of Remaining Life*

by Hideo Ono**, Kanta Nihei**,
Shohei Yoshida** and Takeshi Horikawa**

キーワード：疲労損傷，非破壊診断，余寿命予測，超音波法，硬さ測定法

1. ま え が き

近年，機械・構造物等の余寿命を予測することの要求は強く，製品の余寿命予測法の開発に対する強い要望がある。これは設計寿命に達しつつある機械・構造物を，さらに状態をモニターしながら延命化を計りたいとする要求からの余寿命予測だけでなく，製品の耐久試験等に応用すれば，新機種等の開発期間の短縮をはかることができるためでもある。

従来，外力を想定した設計段階での寿命予測法は大筋で判明している。しかし，実稼動中の機械装置の余寿命を推定しようとするとき，この方法では必ずしも十分とは言えない。

そこで，工学的な余寿命予測の手段として実機に累積されている疲労損傷を非破壊的検出法により直接測定する方法を確立し，従来法の欠点を補うことができれば，余寿命予測に大きく役立つものと考えられる。この非破壊的な疲労損傷検出法については，すでに20年以上前に基礎研究が行われているが¹⁾，その後実用には至っていないようである。現在では運輸省船舶技術研究所で磁気ひずみ法²⁾，磁界中超音波法³⁾，超音波遷移温度測定法⁴⁾について行われている以外，ほとんど研究は見当たらない⁵⁾。

ここでは非破壊的な疲労損傷検出法を用いた余寿命予測法の考え方，及び二三の検出法について実験を試みた結果を紹介する。

2. 余寿命予測法

2.1 損傷検出法の位置づけ

機械・構造物の余寿命予測の手順には大きく分けて二

図1 機械・構造物の寿命・余寿命予測手順

*原稿受付 昭和62年7月10日

** 川崎重工業(株)技術研究所強度研究室
Kawasaki Heavy Ind. Ltd.

表 1 供試材の化学成分

材料名	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
S 15 CK	0.17	0.28	0.43	0.006	—	—	—	—	—
SCM 435	0.33	0.23	0.73	0.017	0.010	0.02	1.06	0.18	0.01

表 2 供試材の機械的性質

材料名	$\sigma_{0.2}$ MPa	σ_B MPa	δ (%)	ϕ (%)
S 15 CK	282	464	36.2	65.8
SCM 435	810	934	21.3	66.2

つの流れがある。図 1 にその概要を示す。まず、ここで言う“従来法”とは実機の使用条件を設定し、温度、応力等の解析、あるいは実働応力頻度の測定を行い、材料の疲労強度データ (S-N 線図など) をもとに損傷則 (修正マイナー則等) を適用して寿命計算を行い、使用期間を差し引いて余寿命を推定するものである。しかしここで考えている余寿命予測とは、機械・構造物のその時の疲労の状態を何等かの方法で検出し、その結果に基づいて残りの寿命を予測することをさしている。

さて、寿命の推定をより正確に行うためには、長期間にわたる実働稼働中の応力頻度を把握する必要がある、これには多大の労力を要し、困難なことが多い。更に、実際の使われ方は客先により差が大きい場合もあり、このような場合には応力頻度の把握は実質的に難しい。

以上のことから、機械・構造物の余寿命を予測するには“従来法”のみでは必ずしも十分とはいえない。さて、余寿命予測法には大きく分けて二種類ある。つまり、①疲労中の性質変化を検出し、その検出量と材料の疲労損傷度の関係を表わすマスタカーブを用いて損傷度を計算し、余寿命を予測する方法 (以下では直接法と記す) と、②部材に疲労度を検出するセンサーを貼布しておき、そのセンサーの損傷度と材料の疲労損傷度の関係を表わすマスタカーブを用いて、損傷度を計算し、余寿命を予測する方法 (以下では間接法と記す) がある。ここでは、直接法、つまり実機材料の疲労中の性質変化を測定する方法に焦点をあてて研究を行った結果について紹介する。

2.2 損傷検出法

疲労損傷のうち疲労き裂については、超音波法などによるき裂寸法の検出とその後の進展寿命の破壊力学を用いた推定法が、ある程度確立されている。したがって、ここで対象とするのは、き裂発生までの累積損傷である。このような、疲労損傷の検出法については、これまでも、超音波法、X 線回折法、渦流法、AE 法、エキソエレクトロン法、硬さ測定法など各種の方法が試みられている。ここでは、これらの方法のうち、比較的コストで、しかも現場での利用が可能なもの、あるいは、最近の計測器類の測定精度の向上が見込めるものなどを勘案して、①硬さ測定法、②超音波法を取り上げた。

なお、X 線回折法も適用可能性ありとみて予備試験を試みたが、精度的に問題があったので断念した。

3. 損傷検出パラメーターと損傷の関係

3.1 実験方法

供試材は、S 15 CK, SCM 435 の 2 種である。表 1, 2 にその化学成分と機械的性質を示す。荷重条件は軸荷重の両振り、又は片振りで、疲労試験機は電気油圧サーボ式 (容量 98 kN) 疲労試験機である。

(1) 硬さ測定法

通常、硬度計で部材の硬さを測定すると表面に圧痕が残り、それが強度上無視できない程大きい場合には測定手段として実用上適当でない。そこで今回は測定時の圧痕が十分に小さく、しかも持ち運びも簡単な硬度計として、ハンディタイプの超音波硬度計 (クラウトクレマー製: MIC 1) を採用した。この硬度計では圧痕の大きさは、本実験の範囲では対角長さが約 0.1 mm 以下であった。測定は試験片を試験機に取り付けたまま、荷重停止時にを行い、1 回当たりの測定点数は 10 点とした。

なお、測定の精度を保つためには硬度計の圧子を試料表面に垂直に当てる必要があるため、位置ぎめ用の治具を製作した。

(3) 超音波法

疲労損傷検出の手段としての超音波法はかなり以前から基礎的な研究がなされており、機械試験所では疲労以外の損傷も含めた、ある程度系統的な研究が行われている。その結果、超音波の減衰が疲労中に増大し、検出パラメーターとして適用可能であるとの結果を得ている。しかし、その後実用に至っていないようである。この原因として測定精度が悪いこと、および検出法が実用に適していないことなどが考えられる。

測定精度に関しては、幸いにも測定機器類の発達によりその向上が期待できる。また検出法に関しても超音波探傷技術の発達により、実用的な疲労損傷検出方法が確立できる可能性がある。

a) 垂直法

超音波探触子 (プローブ) は縦波垂直型の 20 MHz

を採用した。超音波探傷器はパルス型 USIP-11 (クラウトクレマー製) を用いた。測定は、試験片にプローブを一定の押しあて力で取り付け、疲労試験中連続的に実施した。測定方法を図 2 に示す。測定パラメータは、試験片底面エコー高さの 1, 2 次の値の比率 (減衰量) とした。原理図を図 3 に示す。エコー高さのモニターは探傷器のゲート機能を利用して、その出力をペンレコーダに連続的に記録した。

また、プローブと試験片の接触媒質は音波の伝達効率及び防錆能力等を考慮して、グリセリン系の日合アセチレン社製のソニコート BS を採用した。

b) 表面波法

プローブは表面波型の 10 MHz (ジャパンプロブ製) を採用した。また、探傷器はパルス型 USL-32 (クラウトクレマー製) を用いた。測定は、試験片にプローブを一定の押しあて力で取り付けたまま、疲労試験中連続的に行った。測定パラメータは発信側のプローブから受信側のプローブに伝わる音波の通過量 (エコー高さ) とした。モニター方法、接触媒質は垂直法と同様である。

3.2 実験結果

(1) 硬さ測定法

図 4 に S15CK 焼鈍材の実験結果を示す。横軸は疲労損傷度 D を表わすパラメータとして N/N_f (N : 負荷の繰返し回数, N_f : 破断繰返し回数) を対数でとり、縦軸にはビッカース硬さ H_v をとっている。焼鈍材では N/N_f の増加に伴ない、 H_v はかなりの増加を示し、平均値で ΔH_v (H_v の変化量) は最終的に 15~20 程度増加した。図中には材料の塑性ひずみ幅 (1 サイクル

図 4 硬さ測定法の実験結果 (S15CK)

中の塑性ひずみの変動範囲) $\Delta \epsilon_p$ の挙動を合せて示している。応力比 (最小応力/最大応力) $R=-1$ の場合、 $\Delta \epsilon_p$ は $N/N_f=10^{-2}$ 程度で急激に増加し、その後 N/N_f が大きくなるにつれて減少する傾向を示す。一方、 H_v は $N/N_f=10^{-2}$ 程度までは殆んど変化せず、それより大きくなるにつれて増加する傾向がみられる。したがって、 H_v の変化の挙動は $\Delta \epsilon_p$ の挙動と対応していることが分る。

図 5 に SCM 435 の実験結果を示す。 N/N_f の増加に伴ない H_v はかなりの変化を示す。とくに 10^{-2} より大きくなると減少するようになり、最終的に平均値で $\Delta H_v=10 \sim 20$ 程度減少した。図中には $\Delta \epsilon_p$ の挙動を合せて示している。 $\Delta \epsilon_p$ は $N/N_f=10^{-2}$ より大きくなると減少する傾向を示す。したがって、この材料も H_v の変化が $\Delta \epsilon_p$ の変化と対応していることが分る。

これらの結果から硬さ測定法は硬化型、軟化型のどちらの材料にも適用できると思われる。

(3) 超音波法

a) 垂直法

図 6 に S15CK 材の $R=0$ の実験結果を示す。縦軸に底面エコー高さの 1, 2 次のそれぞれの値、および減衰量 α (1, 2 次エコーの比率) を dB 表示している。

図 3 底面エコーの測定原理

図 5 硬さ測定法の実験結果 (SCM 435)

図6 超音波垂直法の実験結果 (S15CK)

この結果, 減衰量 α は N/N_f の増加に伴ない大きく変化し, 初期の値から 10 dB 以上も増加した。したがって, この場合のように応力が高く, 低サイクル疲労の領域では本方法の適用の可能性が十分にあると思われる。

b) 表面波法

図7に S15CK 材の実験結果を示す。縦軸は, 通過エコーのピーク値を dB 表示している。この結果, N/N_f の増加に伴ない, エコーピーク値 P が大幅に減少した。 P が急激に減少する N/N_f の値は 0.5 程度であり, 0.8 では初期から 6 dB 程度減少した。微視き裂の発生は $N/N_f = 0.8$ 程度であり, それまでにある程度 P は減少しており, き裂が入ると更に急激に P は低下していき, その変動幅が大きくなる傾向を示す。なお, $\Delta \varepsilon_p$ に関しては P との対応関係は殆んどみられない。この結果本方法も低サイクル領域に対して適用可能であると思われる。

4. 余寿命予測法

ここでは上記の実験結果, 及び追加実験結果に基づき各測定値と疲労損傷度の関係からマスターカーブを作成し, 余寿命予測法について説明する。

4.1 硬さ測定法

損傷検出パラメータとしては初期の硬度値からの硬度の変化量 ($\Delta H_v = H_v - H_{v0}$) をとった。図8は S15CK

図7 超音波表面波法の実験結果 (S15CK)

図8 硬さ測定法マスターカーブ (S15CK)

の結果である。応力レベルは2種類のみであるが, あえてこれらのデータを包含するバンドを作成し, その下限をマスターカーブとした。これによると例えば, 初期状態から硬さが5増加したとすると ($\Delta H_v = 5$), そのときの材料の損傷度は 0.06 程度まで至っており, 余寿命は 0.94 となる。

余寿命はこの値を時間に換算すればよい。図9は SCM435 の結果である。応力レベルは4種類であるが, これも S15CK と同様なマスターカーブを作成した。この場合には, 例えば硬さが初期状態から10減少したとすると ($\Delta H_v = -10$), そのときの損傷度は 0.90 まで至っており, 余寿命は 0.10 となる。以上のように, 材料によっては全寿命の 1/10 以下で余寿命が推定できる可能性がある。

4.2 超音波法

(1) 垂直法

損傷検出パラメータとしては初期の減衰量 α_0 からの変化量 $\Delta \alpha = \alpha - \alpha_0$ をとることとした。図10は S15CK の結果である。これは, 図6の実験結果から作成したも

図9 硬さ測定法マスターカーブ (SCM435)

図10 超音波垂直法マスターカーブ (S15CK)

のである。これによると初期から $\Delta\alpha$ が 10 dB 増加すると、損傷量は 0.1 程度であり、余寿命は 0.9 となる。この場合には、低サイクル疲労の領域では、全寿命の 1/10 程度の時期に余寿命推定が出来る可能性がある。

(3) 表面波法

検出パラメータとしては初期のパルス通過量 P_0 からの変化量 $\Delta P = P - P_0$ をとった。図11は S15CK の結果である。一応力レベルで 3 対の実験データを包含したバンドを作成し、その下限をもってマスターカーブとした。これによると、例えば ΔP が 3 dB 増加すると、そのときの材料の損傷度は 0.7 であり、余寿命は 0.3 となる。表面波法において、今回の実験結果では全寿命の 7 割以上経過した段階でないと余寿命推定は難しいといえる。なお、今回使用したものよりも高周波の探触子を用いれば、余寿命推定時期を早める事が出来ると考えている。

5. あ と が き

本報告では機械・構造物の余寿命予測の新しい手法として実機の損傷を直接検出する方法として硬さ測定法、および超音波法について実験的研究を行い、両方法が今後実用の可能性があることを示し、余寿命予測法を提案

図11 超音波表面波法マスターカーブ (S15CK)

した。

しかしながら、本手法のような非破壊的検出法を用いる場合、測定値に対する信頼度が問題となるので、実機への適用には信頼性を考慮した手法が是非とも必要であり、今後の課題と考えている。また材料によっては適用が難しい場合もあるので、そのような場合には間接的な方法として、損傷検出センサーの使用による余寿命予測が役立つと考えられる。

参 考 文 献

- 1) 干潟, 金属の塑性変形と超音波減衰の関係について, 機械研究所報告, 第39号 (1980)
- 2) 吉井, 磁気ひずみ効果による疲労度判定について, 非破壊検査, 第35巻, 第2号 (1986)
- 3) 勝又他, シェンク疲労試験における50キロ級鋼の磁界中の超音波減衰特性, 非破壊検査, 第33巻, 第2号, (1984)
- 4) 野間口, 超音波遷移温度法による鋼疲労度の推定, 非破壊検査, 第35巻, 第2号 (1986)
- 5) R. B. Mignogna, et al., Early Detection of Fatigue Cracks in Aircraft Aluminium Alloy Sheets, Material Evaluation (1980)