高効率マルチ疲労試験システムの開発[†]

北 條 浩* 生 野 元**

Development of an Efficient Multi Fatigue Testing System

by

Hiroshi HOHJO* and Hajime IKUNO**

In order to accelerate the development of structural materials and improve reliability under an actual environment over extended and practical lifetimes, a multi fatigue testing system, the test efficiency of which is twelve times greater than that of the conventional fatigue testing system, has been developed.

The fundamental components of this system are (1) a unified hydraulic power unit, (2) six individual testing units, each of which has an actuator and a frame for accurate test control, (3) original software that enables stable control and has a graphical user interface with a labor-saving function, such as an automatic start function after elevating and holding the test temperature.

The cost of this system is very low, because of the elimination of the exclusive controller and unification of the hydraulic power unit.

Using this system, fatigue tests of six specimens can be simultaneously carried out with respective testing conditions, without interference among testing units, while other tests are still in progress. In addition, the multi fatigue testing system enables stable and accurate fatigue tests over a long period of time. Furthermore, the newly developed system can reduce the operating time remarkably, by employing convenient software. As a result, the evaluation period for the fatigue properties of materials could be remarkably shortened in comparison with the conventional fatigue testing system.

The reliability of the proposed fatigue testing system was verified based on the stability of the waveform and the load amplitude, the relative deviation among testing units, and the reproducibility of the S-N diagrams obtained by the conventional system. As a result, the proposed multi fatigue testing system was confirmed to provide high performance.

Key words : Material testing facility, Test efficiency, Very high cycle fatigue, Multitask control

1 緒 言

自動車などの機械構造物の軽量化に伴い、構造用材料の耐久性向上と強度保証が益々重要となっている。構造用材料の開発を迅速に進めるには、実用環境下での強度信頼性を迅速に評価し、その結果を次の試作に反映させる必要がある。種々の評価項目のうち、特に、疲労強度特性の評価には、多大な時間を要する。例えば、1種の材料について、 10^8 回を超えるような実用長寿命域の疲労特性を評価するには、従来の疲労試験機（1軸式、試験速度：50Hz）を用いると、 10^8 回の評価に試験片1本当たり約23日かかり、これをさらに、データの信頼性を高めるために数本、同様の試験を行うと、数ヶ月以上の時間がかかってしまう。

このような実用長寿命域の疲労特性の評価を迅速に行うために、種々の疲労試験システムが開発されている。^{1)~4)} 繰返し速度が1kHz以上の高速タイプの試験システム^{1),2)}では、試験効率は高いものの、従来の繰返し速度（10～60Hz）で得られる疲労特性の再現性（特に、高温疲労などの実用環境下での特性）という点でまだ課題が多い。一方、広く普及している回転曲げ疲労試験機は、低コス

トで、多連化が容易である³⁾反面、実用上重要な平均応力下の疲労試験ができないことや、最大応力が最表面にのみ生じるため、特性のばらつきや寸法効果などの課題がある。また、従来から実績のある軸荷重タイプの電気油圧式疲労試験機は、制御精度が高く、汎用性に優れるが、高価な専用コントローラを備え、併設するとコスト高となるうえ、運用工数もかかる。

以上のように、従来の技術では、試験効率、信頼性、コストのすべてを同時に満足する疲労試験システムが見当たらないのが現状である。

そこで、本研究では、試験効率が画期的に高く、かつ、高精度、低コストで運用工数もかからない疲労試験システムを開発することを目的とした。

2 マルチ疲労試験システム

2・1 基本構成

開発疲労試験システムの動力機構としては、制御精度が高く、従来から実績がある電気油圧式サーボバルブを用いた油圧アクチュエータを採用した。そして、基本コンセプトは、以下の通りである。

(1) 従来機で用いられている、高価な専用コントロー

[†] 原稿受理 平成19年4月6日 Received Apr. 6, 2007 ©2007 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 (株)豊田中央研究所 〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町, Toyota Central R & D Labs., Inc., Aichi-gun, Aichi, 480-1192

** (株)豊田中央研究所 〒480-1192 愛知県愛知郡長久手町, Toyota Central R & D Labs., Inc., Aichi-gun, Aichi, 480-1192

ラを廃し, 多連化 (マルチ化) した試験ユニットを1台のPCと独自に開発したマルチタスク制御ソフトにより一括直接制御する。

(2) 信頼性の必要なアクチュエータやフレームは, 各試験ユニット毎で完全に独立とする。

(3) 油圧源は共通一元化し, 油圧は各試験ユニットに並列供給する。油圧源の共通化による試験ユニット間の相互干渉は, 制御方法の工夫により回避する。(2・2・4項で詳述)

(4) 運用工数をできるだけ削減するために, オペレータ

とのインターフェースは, GUI (Graphical User Interface) を多用し, 試験の自動開始機能などの省力化機能を盛り込んだ, 独自開発ソフトとする。

以上の基本構成によって初めて, 高効率, 高精度, かつ, 低コストな疲労試験システムを実現した。

2・2 特徴・機能

開発したマルチ疲労試験システムの概略図を Fig. 1 に, システム全体の外観写真を Fig. 2 に, 主な仕様・機能を Table 1 にそれぞれ示す。以下に, 主な特徴について述べる。

Fig. 1 Configuration of multi fatigue testing system.

Fig. 2 Appearance of multi fatigue testing system.

Table 1 Specification of multi fatigue testing system.

Control system	Electro-hydraulic servo system
Testing unit	6 units : capable of simultaneous testing with respective condition and operation without interferences among testing units while other tests are still in progress
Force range	$\pm 5\text{kN}$ ($\pm 510\text{kgf}$)
Testing waveform	Sine waveform, Frequency : max 100Hz
Actuator stroke length	max $\pm 5\text{mm}$
Testing temperature	RT~max 350°C Elevating rate : RT $\rightarrow$ 350°C; approximately 30min Furnace : Uniform temperature chamber with fan
Control function	Control mode : Load control mode, actuator stroke control mode
Automatic function	Automatic start function after elevating and holding the test temperature
Hydraulic power unit	Pressure : 14MPa Flow rating : approximately 26L/min

2・2・1 低コスト化 前述のように、油圧源は1台とし、対面式に3台ずつ並べて設置した6台の各試験ユニットに作動油を並列に供給する構成とした。サーボアンプやロードセルアンプ、変位計アンプ、無停電電源装置、漏電ブレーカーなどの必須基本部品をアンプユニットに設置した。

また、制御用PCは市販のDOS-V機とし、内蔵したDA変換、AD変換などのインターフェースボード類を介してアンプユニットと接続している。試験機の制御は、マルチタスク機能を有する独自のソフトウェアにより、6台の試験ユニットに対して順次、連続的に行っている。このように、従来機のような高価な専用コントローラを用いずに、市販のPCと独自に作成したソフトウェアにより直接制御することにより、安価でありながら安定して高精度な試験ができる制御システムを構築することができた。

2・2・2 高精度・高信頼性化 試験機としての信頼性を確保するために、各試験ユニットは、完全に独立なフレームで支持することにより、試験ユニット相互間の振動の影響を受けないようにした。ロードセルの下に設けた軸芯調整装置は、試験片に曲げや偏芯荷重が加わらないように、負荷ロッドの軸芯を合わせるものである。

また、試験片、負荷ロッドの高速昇温、均熱化を図る恒温槽を各試験ユニットに設置した。試験温度については、試験片に接触させた熱電対で温度を計測すると接触熱抵抗や外乱（均熱化のための槽内攪拌など）による誤差が大きい。そこで、検定用試験片に直接スポット溶接した熱電対により正確かつ安定に計測した温度と恒温槽内の試験片近くに設置したシース熱電対により計測した槽内温度との関係を予め求めておき、その関係に基づいて恒温槽の温度を制御することで試験片の温度制御を行えるようにした。

次に、疲労試験機としての信頼性を検証するため、制御精度、疲労特性の再現性の確認、従来機との比較を行った。

Fig. 3に、荷重波形の例、および、振幅変動を解析した結果を従来機（電気油圧サーボ1軸式、試験速度：50Hz）と比較して示す。従来機では、正弦波の一部分が乱れているのに対し、開発機では、滑らかな正弦波になっている。これは、円周上等間隔に3枚のひずみゲージを貼ったダミー試験片を用い、ロードセル下部の軸芯調整装置により負荷ロッドの軸芯を高精度に合わせることで実現した。また、振幅変動の標準偏差は、開発機では従来機の約1/5の0.06%と非常に小さく、安定した振幅で制御できている。本開発機では、通常フィードバック制御とは異なり、現在値と目標値の誤差に基づいて目標値自体を変更し、誤差を直接反映させて目標値を補正することにより振幅変動の補正を行っている。これにより、安定した振幅制御を実現した。

開発した疲労試験システムにより得られる疲労S-N線図が試験ユニット間で差がないかどうか調べた。標準試

Fig. 3 Comparison of waveform and load amplitude stability between conventional system and developed system.

料として、欠陥が少なく、安定した特性が得られる AC8A-T6 連続鋳造材を選定し、同一ロットの連鋳丸棒から切出した試験片について試験ユニット No. 4～6 を用いて 350℃ の両振引張一圧縮疲労試験を行った。結果を Fig. 4 に示す。3 台の試験ユニットではほぼ一致した疲労 S-N 線図が得られ、試験ユニット間で差がないことを確認できた。

また、従来機で得られた疲労 S-N 線図を開発機でも再現できるかどうか調べた。同一ロットの標準試料 (AC8A-T6 連続鋳造材) から切出した試験片について 200℃ の片振圧縮疲労試験を行った結果を従来機で得られた結果と比較して Fig. 5 に示す。開発機で得られた S-N 線図は、従来機のそれとほぼ一致し、疲労特性についても再現性を確認することができた。

2・2・3 試験効率 開発したマルチ疲労試験システムは、試験ユニット 6 台を備え、各試験ユニットの試験速度を従来機の 2 倍の 100Hz とすることで、試験効率を従来機 (50Hz × 1 軸) に比べて 12 倍にした。Fig. 6 は、組成や欠陥量の異なるアルミニウム合金鋳物からの切出

Fig. 4 Tension-compression fatigue S-N diagram of AC8A-continuous casting evaluated by different testing units on developed system.

Fig. 5 Comparison of compression fatigue S-N diagrams of AC8A-continuous casting evaluated by conventional system and developed system. Every specimen have been pre-heated in 200°C x100hrs.

Fig. 6 Examples of high temperature fatigue properties of aluminum alloy castings with different composition and amount of defects evaluated by developed system.

し試験片について、高温疲労強度を開発機により評価した例である。Fig. 6 の 5 本の S-N 線図の全データ 51 点を求めるのに要した日数は、Fig. 7 に示すように、開発機で 8 日であった。同様のデータを従来機 (50Hz × 1 軸) を用いて採るとすると、約 92 日必要であり、開発機を用いることにより評価時間を約 1/12 に低減できることがわかる。また、これらの結果から、材料の疲労特性に及ぼす組成や欠陥量の影響を短期間で把握でき、材料開発や信頼性検証を迅速化できることが確認できた。

なお、各試験ユニットには、電気油圧サーボ式アクチュエータと恒温槽を個別に備えているので、それぞれのユニット毎で異なる負荷条件、異なる試験温度で試験することが可能である。また、試験ユニット数、荷重容量、試験波形、試験ストローク、試験温度については、目的とする試験条件に合わせて仕様を変更することができる。

2・2・4 長期安定性 マルチ疲労試験システムで最も重要な機能は、各試験ユニット間の相互干渉を完全に排除し、各ユニットの試験が完全に独立に長時間異常停止することなく動作することである。

Fig. 7 Comparison of evaluation period for fatigue properties shown in fig.6 (five S-N diagrams, 51 datum ranging from 10^5 to 3×10^7 cycles).

このような動作安定性を実現するには、動作安定性が保証された専用コントローラを用いるのが容易な手段と思われるが、本開発システムでは画期的に装置構成を簡略化するために、あえて、専用コントローラを用いず、独自開発のソフトウェアで全ての試験ユニットの制御とオペレータとのやり取りを行う方式を採用した。ただし、ソフトウェアにはバグが付き物であり、安定性を確保するためには、動作不安定の原因となるバグを完全に取り除き、完璧なソフトウェアに仕上げる必要がある。また、動作安定性の阻害要因としては、試験片の破断、恒温槽・油圧源などの異常動作など、様々なものが想定される上、想定外の異常が生じることも考えておく必要がある。さらに、多くのユニットの同時制御、オペレータとのやり取り、異常を検知した際の迅速な対応策等の各種処理を、他のユニットの試験が完全に停止することなく実行できる完全なマルチタスク機能を実現しなければならない。開発したソフトウェアは上記のことをすべて具備した基本アルゴリズムに基づいてプログラミングした上で、数年にわたる実証試験に基づきバグ取りとバージョンアップを重ねて完璧に安定動作する状態に仕上げたものである。

以上のような制御システムの構築によって、全試験ユニットにおいて長期間、安定して疲労試験を継続することが可能となった。

2・2・5 省力化機能 試験システムの起動後は、全試験ユニットへの油圧の供給、恒温槽の制御を開始し、各試験ユニットに試験片を取付けて試験条件を設定し、順次、試験を開始する。

前述のソフトウェアは、オペレータが使い易いインターフェース機能 (GUI) も備えている。Fig. 8 に上記ソフトウェアの主要な操作画面を示す。試験片の取付け、条件設定、試験開始の指示は、各試験ユニットの個別画面 (Fig. 8 (b)) 上で行う。条件設定は、試験 No. や試験片の記号・番号、緒元のほか、試験温度・試験応力を入力すれば、恒温槽の設定温度、荷重振幅、平均荷重、荷重の上下限、振幅の閾値を自動計算し、セットされるようになっている。このように、オペレータによる入力を簡素化し、操作ミスや設定ミスを防止する工夫を盛り込んだ。

試験開始モードは、即時スタートモードと、設定温度到達後、所定の時間保持後自動スタートするモードを選択することができる。この自動スタート機能により、オペレータの待機時間を省くことができ、疲労試験にかかる工数を大幅に削減することができる。

また、モニタ表示は、各試験ユニットの個別画面のほかに、全ユニットの状態表示画面 (Fig. 8 (a)) や、各試験ユニットの試験開始～直近までの波形履歴の表示画面に、ワンクリックで切換えることができ、試験の状況が即座に把握できるようになっている。

Fig. 8 Examples of operating windows.

試験片破断などの異常を検知した時（荷重や変位が上下限值を超えたり，荷重振幅がしきい値を下回った場合）には，停止動作を自動的に行って試験片および破面を保護するとともに，停止原因の情報をモニタ上に表示する．また，オペレータは試験結果や波形履歴などのデータファイルを取り出してより詳細に解析できる．

以上のように，オペレータが実際に操作する手間は非常に少なく，注意深く作業しても試験片 1 本当たり約 1hr 程度である．多くの試験片を評価しようとする，運用工数の低減は極めて重要であり，本システムでは，ユーザの立場に立った GUI の多用と省力化機能により運用工数の大幅削減も同時に達成した．

3 結 言

軽量化などに伴い，耐久性の向上と信頼性保証が益々重要となる構造用材料の開発，および，実用環境下・実用長寿命域における材料の強度信頼性評価を迅速化するため，従来機比 12 倍の試験効率を有する独自のマルチ疲労試験システムを開発した．

主な特徴は，

- 低コストな構成，高精度，高効率
- 長期間安定した試験が可能
- 画期的に運用工数を削減

である．

参 考 文 献

- 1) J. M. Morgan and W. W. Milligan, "A 1kHz servohydraulic fatigue testing system", Proceedings of the Conference on High Cycle Fatigue of Structural Materials, TMS, pp.305-312 (1997).
- 2) R. Ebara, "The present situation and future problems in ultrasonic fatigue testing -Mainly reviewed on environmental effects and materials' screening", International Journal of Fatigue, Vol.28, pp.1465-1470 (2006).
- 3) T. Sakai, M. Takeda, K. Shiozawa, Y. Ochi, M. Nakajima, T. Nakamura and N. Oguma, "Experimental Reconfirmation of Characteristic S-N Property for High Carbon Chromium Bearing Steel in Wide Life Region in Rotating Bending", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.49, No.7, pp.779-785 (2000).
- 4) T. Furusawa, T. Sakai, R. Takizawa, M. Nakajima, K. Shiozawa, N. Oguma, K. Okada, Y. Ochi, A. Sugeta, N. Kawagoishi, A. Sakaida and H. Sakamoto, "Development of multi-type fatigue testing machine in axial loading and verification of its fundamental performance", Transaction of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol.72, No.718, pp.886-894 (2006).