溶接ベローズ用薄板材の疲労試験*

平 田 養^{*1}, 中 島 晃^{*2}
岡 田 健^{*3}, 小 川 義 博^{*1}

Fatigue Test of Thin Plate for Welded Bellows

Osamu HIRATA, Akira NAKAJIMA,
Ken OKADA and Yoshihiro OGAWA

It is commonly difficult to carry out a fatigue test of a very thin plate of approximately 0.1 mm to 0.3 mm thickness by means of a conventional test apparatus. In order to test the thin plate for welded bellows, the authors developed a new fatigue test system utilizing the resonance vibrations of the test plate. The system is composed of a speaker, an amplifier, a function generator, a laser displacement meter and a personal computer. One end of the test plate is fixed like a cantilever on the cone of the speaker and vibrates at a designated frequency. First, the characteristics of this test apparatus were examined. As materials of the test plate, Ni base alloy A and Ni base alloy B for welded bellows were used. The calculated bending stress based on the deflection curve of the cantilever with notch was in close agreement with the measured stress by the strain gage. Furthermore, it was confirmed that the displacement amplitude of the test plate decreases with the crack propagation and the occurrence of fatigue crack is detected accurately during the test. The results were arranged in the S-N curves, where S is the stress amplitude calculated using the measured displacement amplitude and N is the number of cycles to surface crack judged by decrease in the displacement amplitude. Fairly different S-N curves were obtained between Ni base alloy plates A and B, but these curves had the same tendency as the results of the repeated displacement test of the practical welded bellows.

Key Words: Welded Bellows, Ni Base Alloy, Thin Plate, Fatigue Test, Resonance Vibrations, Displacement Amplitude, Bending Stress, S-N Curve, Seal

1. 緒 言

溶接ベローズは、近年使用環境がますます厳しさを増す中、その品質向上あるいは付加価値の向上が図られ、用途も従来からの管継手の域を脱した広がりを見せている。例えば、配管内を高温高圧の蒸気、ガスが通過する場合の外気温度や流体温度の温度変化による配管の膨張収縮および振動の吸収が可能な機械要素として使用されるほか、流体圧力をベローズの伸縮量として感知できる圧力センサ素子として活用されたり、石油化学プラントや火力原子力プラントの配管系において用いられるバルブのステム貫通部の軸封装置などとしてもその機能を提供している。

バルブの軸封用溶接ベローズの材料としては、一般的にはオーステナイト系ステンレス鋼が、高温高圧用には高強度材であるニッケル系合金がもっぱら使用されている。溶接ベローズは、円環状薄板を成形後内径部、外径部を交互に溶接して作られるが、プレート1枚ずつを溶接したシングルプライ形のみならず2枚ず

つを重ねて溶接したダブルプライ形もよく使用されている。特にダブルプライ形溶接ベローズは、2枚の板を必ずしも同種材とする必要がなく、使用環境にあった材質を選定し、異種材溶接ベローズ⁽¹⁾として使用することも可能である。しかしながら、ベローズの耐久性を推し量る上で必要な、使用される材料の同じ熱処理条件における疲労試験データは少ない。しかも、ベローズと円板厚での試験データは皆無に等しい。従来、ベローズの疲労寿命を推定する場合には、ベローズ自体を試験サンプルとして直接寿命試験を行う方法が採られてきたが^{(2)~(4)}、ベローズ自体を使ってS-N曲線を作成するには、多くの費用と時間が必要である。

一方、近年コンピュータの進歩によって有限要素法による応力解析が比較的容易にできるようになってきており、ベローズの形状や使用条件により異なる応力状態をかなり正確に計算することができる。したがって、ベローズに使用される薄板の疲労寿命(S-N曲線)さえわかれば、有限要素法により求められた応力から溶接ベローズの寿命推定が可能となる。しかしながら、溶接ベローズに用いられるような薄板の疲労試験を通常の試験機で行うことは困難である。そこで、本研究では、共振形の疲労試験装置を新たに考案製作

* 平成6年8月18日 第72期全国大会において講演、原稿受付 平成6年3月28日。

*1 正員、イーグル工業(株) (〒716 高梁市落合町阿部 1212)。

*2 正員、佐賀大学理工学部 (〒840 佐賀市本庄町 1)。

*3 イーグル工業(株) (〒350-02 坂戸市片柳 1500)。

し、その基本的な特性および有用性を検討するとともに溶接ペローズ用薄板の疲労試験を行った。

2. 試験装置の構成と原理

2.1 試験装置と試験片 今回製作した共振形の疲労試験装置は、著者らの1人が電析Ni薄膜の縦弾性係数測定用に開発した試験装置⁽⁵⁾をベースにしている。計測制御系を含む試験装置の概要を図1に示す。試験装置本体は、試験片をつかみ振動させるための取付台をコーンに接着したスピーカ、増幅器および周波数発信器からなっている。また、パーソナルコンピュータにより周波数発信器を制御し、周波数と出力電圧を変えることができるようになっている。試験片の振幅はレーザ変位計により測定されA/D変換器を介してパーソナルコンピュータにデータを取り込み、試験片の変位から応力を計算しハードディスクに保管することができる。

図2に試験片の形状・寸法を示す。試験片にはノッチを入れ、その部分に応力を集中させるようにした。また、試験片は、上端から7.5 mmの範囲をつかみ、下端は自由な片持ちばり状態で振動する。

2.2 試験片のたわみ曲線と発生応力 一般に、はりに加わる曲げモーメントとたわみの関係は次式により表せる。

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = M/EI \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここで、

y : たわみ量 mm

x : 試験片の先端からの距離 mm

M : 曲げモーメント N-mm

E : 縦弾性係数 N/mm²

I : 断面2次モーメント mm⁴

である。幅 b 、厚み h の板の断面2次モーメントは、

$$I = b \times h^3 / 12 \quad \dots\dots\dots (2)$$

であり、試験片が曲率半径 r のノッチをもつ片持ちばりであるので、 b は次式のように変化する。

$$b = \begin{cases} B_2 & (0 \leq x \leq L_2, x \geq L_1 + L_2) \\ B_1 + 2r - 2\sqrt{r^2 - (x - r - L_2)^2} & (L_2 < x < L_2 + L_1) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (3)$$

図2に示すように x 方向の長さを L_0 , L_1 , L_2 とし、自重により作用する分布荷重の単位長さ当たりの

図1 試験装置の概要

図2 試験片の形状・寸法(単位:mm)

力をそれぞれ w_0 , w_1 , w_2 とすると、曲げモーメント M は次式となる。

$$M = \begin{cases} \omega^2 x^2 / 2 & (0 \leq x \leq L_2) \\ \omega_2 L_2 (x - L_2/2) + M_1 & (L_1 < x < L_1 + L_2) \\ \omega_2 L_2 (x - L_2/2) + \omega_1 L_1 (x - L_2 - L_1/2) \\ \quad + \omega_0 (x - L_2 - L_1)^2 / 2 & (L_1 + L_2 \leq x \leq L_0 + L_1 + L_2) \end{cases} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、はりの密度を γ とすると ω は次式で与えられる。

$$\omega = \gamma \times b \times h$$

また、 M_1 はノッチ部分の曲げモーメントでノッチ部の微小幅を $d\zeta$ とおくと次式で与えられる。

$$M_1 = \int_0^{x-L_2} \{B_1 + 2r - 2\sqrt{r^2 - (\zeta - r)^2}\} d\zeta \times \gamma \times h \times (x - L_2 - \zeta)$$

$$= \gamma h \int_0^{x-L_2} \{B_1 + 2r - 2\sqrt{2\zeta r - \zeta^2}\} (x - L_2 - \zeta) d\zeta$$

$$M_1 = \gamma h \left[\frac{(B_1 + 2r)\eta^2}{2} - \frac{(\eta^2 - \eta r + 3r^2)\sqrt{\eta(2r - \eta)}}{3} - r^2 \sin^{-1}\left(\frac{\eta - r}{r}\right) + r^3 \cos^{-1}\left(\frac{r - \eta}{r}\right) - \frac{\pi \eta r^2}{2} \right] \dots (5)$$

ただし, $\eta = x - L_2$ とおいた。

境界条件として拘束位置 ($x = L_0 + L_1 + L_2$) において, $y, dy/dx = 0$ とし, (1) から (5) の連立微分方程式を解くことではりのたわみ曲線が求められる。曲げ応力 σ は,

$$\sigma = M/Z = M/(bh^2/6) \dots \dots \dots (6)$$

であり, M は式 (4) で, b は式 (3) で求められる。以上の計算式によりはりの自重による変位量と応力が計算できる。

実際に, 固有振動数で試験片を共振させたときの振動加速度を α , レーザ変位計の測定位置 x_1 における変位量の片振幅を v とすると, 試験片に発生する最大応力 $S_{\max}$ は以下の式で与えられる。

$$v = \alpha \times y(x=x_1)$$

$$S_{\max} = \alpha \times \sigma_{\max} = \{v/y(x=x_1)\} \times \sigma_{\max} \dots \dots \dots (7)$$

以上の式を用い, 試験片の縦弾性係数を 192 GPa とし求めた変位量と曲げ応力計算例を図 3 に示す。この結果から, 最大応力はノッチの中心部で発生していることがわかる。

3. 実験方法と結果

3.1 試験片材料 試験片の材料としては, 高温高圧用に使用されるニッケル系合金のなかから機械的性質を表 1 に, 化学組成を表 2 に示すような 2 種類の

Ni 基合金を選定した。試験片は, 溶接ペローズのフープ材をワイヤカットにより図 2 に示す形状・寸法に加工した後, 溶接ペローズと同じ工程で洗浄と熱処理 (溶体化処理 1366 K, 時効処理 993 K & 893 K) を実施した。

3.2 固有振動数の測定 まず, スピーカに取付けた試験片を一定周波数で 2 秒間振動させそのときの振幅をレーザ変位計で測定する。その後, 周波数を 0.1 Hz 単位で増加させながらそれぞれ 2 秒間振動させ振幅を測定する。この操作を繰返し, 変位量が最大になるところを固有振動数とした。

試験結果を表 3 に示す。同一形状・寸法の試験片の場合には重力の影響を無視すると固有振動数 f と縦弾性係数 E および密度 γ との間には, $f^2 \propto E/\gamma$ の関係がある⁽⁵⁾。Ni 基合金 A と B の密度はそれぞれ 8.24 と 8.43 gr/mm³ である。例えば, 試験片番号 1 と 2 で比較すると f^2 の比は 1.03 で, E/γ の比も 1.03 であることから, Ni 基合金 A と B の固有振動数の違いは, 縦弾性係数と密度の違いによるものであることが確認できる。

表 1 実験材料の機械的性質

Items	Ni base alloy A	Ni base alloy B
Yield strength (MPa)	1187	683
Tensile strength (MPa)	1442	1096
Elongation (%)	17	37.6
Elastic modulus (GPa)	192	190

表 2 試験片の化学成分 (mass %)

Items	C	Mn	Cr	Mo	Al	Ti	Ni	Fe	Nb+Ta
Ni base alloy A	0.035	0.02	18.6	3.14	0.51	1.03	Bal	19.2	5.00
Ni base alloy B	0.09	0.33	21.6	9.35	0.31	0.35	Bal	2.49	3.64

表 3 固有振動数測定結果

Sample NO.	Shape NO.	Material	Natural frequency (Hz)
1	1	Ni base alloy A	66.0
2	1	Ni base alloy B	65.0
3	2	Ni base alloy A	71.1
4	2	Ni base alloy B	69.9

図 3 はりのたわみ曲線による変形量と応力の計算結果

3・3 応力の測定 試験片番号2および4について、試験片のノッチ部にゲージ長1.0 mmのひずみゲージを貼付け、固有振動数で振動させたときのひずみを測定し、応力はひずみに縦弾性係数をかけた等価弾性応力として整理した。その結果を図4に示す。測定された変位の振幅と応力は比例関係にあることが確認される。

3・4 疲労試験 試験片番号1から4を用いて疲労試験を実施した。試験は、まず周波数掃引試験により試験片ごとに固有振動数を求めた後、その固有振動数で振動させた。周波数発生器の出力電圧を変化させることにより試験片の振幅を変化させた。

図4 応力測定結果(振幅と応力値の関係)

(a) 全振幅が大きい場合

(b) 全振幅が小さい場合

図5 疲労試験実施中における全振幅の変化状況

図5は試験実施中の振幅の変化を示したものである。図5(a)は応力が高く疲労き裂が発生した場合の例であり、 1.5×10^4 回付近から振幅が急激に低下していることがわかる。図5(b)は比較的応力が低い場合であり、 1×10^7 回後においても振幅の変化はなくほぼ一定値を示している。

4. 考察

4・1 応力およびたわみの計算値と実測値の比較

応力は、第2章に示した計算式に従い、レーザ変位計による実測変位量を用いて計算した。計算応力とひずみゲージによる測定応力の関係を図6に示す。なお、計算により求めたノッチ部の応力分布は図7に示すようであり、ゲージ長1.0 mmのひずみゲージによる測定値は最大応力ではなくゲージ長範囲での平均的な値となっていると考えられる。そこで、応力分布から平均応力を計算し図6に合せてプロットしてみた。その結果、測定値と計算値は10%の誤差内でよく一致することがわかった。また、試験片の変形状態を確認するために高速カメラで撮影した例を図8に示す。変形状態は図3に示したたわみ曲線とほぼ合致することが確かめられ、試験片の実測変位量から応力を求める本計算法の妥当性が示された。

図6 計算応力と測定応力の関係

図7 ノッチ部の計算応力分布状況

4.2 疲労試験時の振幅の変化 疲労試験実施時の試験片変位の振幅は、図5(a)に示されているようにある繰返し数までは一定でその後急激に低下する場合があった。そこで、試験片番号2を用い、ある繰返し数ごとに試験片ノッチ部の表面を顕微鏡で観察した。その結果を図9にまとめているが、振幅の変化を示すグラフの▽記号のところで表面を観察している。試験に際しては、試験片の取付・取外しごとに固有振動数

図8 高速カメラで撮影した試験片のたわみ状態

を探索し、その振動数で目標変位量になるよう周波数発振器の出力電圧を変化させた。なお、試験片の取付・取外しによる変位量の再現性は0.1 mm以下であった。図9の写真より、微小なクラックがまず表面に現れ、クラックが徐々に大きくなりクラックがつながっていくのが観察される。試験片の振幅は繰返し数が 5×10^4 回付近から減少しはじめているが、 4×10^4 回ではクラックは観察されず、 7.8×10^4 回でクラックが観察された。さらに、 1.9×10^5 回では微小なクラックがつながり大きなクラックに成長している。このときの試験片の振幅の変化は初期値の93%程度の低下である。さらに試験を続行し、 3.1×10^5 回になるとクラックの開口部の幅が大きくなり、クラックが板厚方向にも進展していると推察される。このように、試験実施中における試験片の振幅の変化は疲労き裂の発生状況と対応づけられ、クラックの発生と進展により試験片の真実の断面積が変化して剛性を低下させ、その結果固有振動数が低くなり共振状態からずれたために起こると解釈できる。

以上、共振法を用いた薄板材の疲労試験において、振幅の変化を感知することによりき裂発生寿命 N_c を特定できることがわかった。溶接ペローズはその多く

図9 疲労試験実施中における試験片変位の全振幅の変化と表面き裂の進展状況
(試験片番号3, 材質: Ni-基合金A, 板厚: 0.248 mm)

図 10 応力とき裂発生寿命の関係

図 11 溶接ペローズの伸縮作動寿命

が軸シール等の密封装置として使用されている。よって、溶接ペローズの寿命はペローズが完全に破断するときではなく、クラックが板厚方向に貫通し密封機能を維持できなくなったときを寿命と考えるべきである。溶接ペローズ用板材の寿命をき裂発生寿命とすれば、溶接ペローズの寿命としてはやや安全側の評価を与えることになるが、図 9 の結果から、振幅が初期値の 93% になったところで試験片表面の全面にわたりクラックが発生していることが観察されているので、さらに若干の余裕を見込んで、き裂発生寿命を初期振幅値の 95% 程度で判定するのが妥当と思われる。

4.3 S-N 曲線 応力は測定された振幅から第 2 章で示した計算式を用いて計算し、疲労寿命は測定振幅が初期の振幅の 95% になったときの繰返し数として作成したペローズ用薄板材の S-N 曲線を図 10 に示す。図 11 は、同じ Ni 基合金 A と B を用いて製作された溶接ペローズの伸縮作動寿命試験の結果⁽¹⁾である。Ni 基合金 B を使用した溶接ペローズの S-N 曲

線は A を使用したものに比較して傾きが緩やかである。図 10 に示した板材の疲労寿命曲線においてもまったく同じ傾向が認められ、溶接ペローズの伸縮量に対する寿命の変化は溶接ペローズ材料の疲労寿命に対応していることが裏付けられた。

5. 結 言

ペローズ用薄板材を片持ちばり状態で共振法させる疲労試験装置を新たに考案し、その特性を検討するとともに 2 種類の Ni 基合金について疲労試験を行い、以下の結論を得た。

(1) 試験片のたわみ曲線を自重による片持ちばりのたわみ曲線として得られた応力計算結果は、ひずみゲージにより測定された応力値と 10% 以内の誤差範囲で一致することがわかった。これにより、試験片のある 1 点における振幅を測定することにより応力が精度よく計算できることを確認した。

(2) 共振法による疲労試験装置を用いて疲労試験を実施した場合には、クラックが発生すると試験片の振幅が減少し、クラックが発生しない場合には試験片の振幅に変化はないことが確認され、き裂発生寿命を特定できることがわかった。

(3) 溶接ペローズは密封装置として使用されることが多いので、寿命としては完全破断よりむしろクラックが貫通して漏れはじめたときが妥当であると考えられる。よって、クラックが発生したことが確認できる本報の寿命試験方法は、溶接ペローズの寿命評価をするためには極めて有効である。

(4) き裂発生寿命を振幅が初期振幅値の 95% になったときの繰返し数として作成した溶接ペローズ用薄板の S-N 曲線と溶接ペローズの伸縮作動寿命の試験結果は同じ傾向を示すことが確認できた。

最後に、本論文を作成するに当たり、配慮下さったイーグル工業(株)に感謝する。

文 献

- (1) 平田・中島・岡田・藤井・佐藤, 機論, **60**-571, C(1994), 1039.
- (2) 石山・ほか 4 名, 精密工学会誌, **57**-10(1991), 1832.
- (3) 浜田・ほか 3 名, 機論, **32**-243(1966), 1640.
- (4) 竹園, 配管技術, **13**-1(1971), 84.
- (5) 高田・岡田・古賀・平林, 日本金属学会誌, **55**-12(1991), 1368.