溶接ベローズの疲労寿命*
(試験速度の影響)平田 養^{*1}, 中島 晃^{*2}, 岡田 健^{*3}
佐々木 信次^{*4}, 小川 義博^{*1}Fatigue Life of Welded Bellows
(Effect of Test Speed)Osamu HIRATA, Akira NAKAJIMA, Ken OKADA,
Shinji SASAKI and Yoshihiro OGAWA

In order to estimate the fatigue life of welded bellows, so far, the fatigue test has been carried out using actual welded bellows, so that it took much money and time to develop a new type of welded bellows. In the present investigation, the $S-N$ curve of welded bellows plotted against the stress amplitude calculated by the finite-element method and the $S-N$ curve of a thin plate for welded bellows have been compared. As a result, it was found that although the fatigue life varies depending on the speed in the fatigue test, the $S-N$ curve of the welded bellows is in close agreement with the $S-N$ curve of a thin plate of welded bellows at the same test speed. Therefore, it is possible to estimate the fatigue life of actual welded bellows accurately utilizing the $S-N$ curve of the thin plate of welded bellows, which is modified by the test speed.

Key Words: Welded Bellows, Ni-Based Alloy, Fatigue Test, Fatigue Test Speed, Stress Amplitude, $S-N$ Curve, Finite-Element Method, Seal

1. 緒 言

溶接ベローズは、石油化学プラントや火力原子力プラントなどの配管系において、配管内を高温高压の蒸気、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伸縮管継手として使用されるほか、バルブのステム貫通部の軸封装置や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などとしてもその機能を提供している。

溶接ベローズの疲労寿命の推定方法としては、従来、実際のベローズを用いて寿命試験を行い、伸縮量や圧力に対する寿命⁽¹⁾として、または簡易計算式により計算された応力に対する寿命⁽²⁾として整理されていた。しかしながら、実際のベローズを供試体として寿命試験を行って寿命を確認する方法は、確実な方法ではあるが、新しいタイプのベローズを開発するたびにたくさんの実験が必要であり、多大な開発時間や費用を要す。

一方、一般の丸棒試験片による $S-N$ 曲線とベローズの $S-N$ 曲線は同程度の傾きではあるが、寿命の絶対値は一致しないことが示されている⁽³⁾。その原因として、ベローズのひずみ分布が丸棒試験片のように一様でないこと、寸法効果、表面上の差異による影響などが指摘されている⁽³⁾。さらに、ベローズが密封装置として使用される場合、その疲労寿命は完全破断よりむしろクラックが板厚方向に貫通したときであることも原因の一つと考えられる。著者らは、実際のベローズに使用される薄板材の疲労試験が行える共振形の疲労試験装置を開発した⁽⁴⁾。この試験装置は、疲労試験実施時の試験片変位の振幅変化からクラック発生寿命を特定することができ、ベローズ用薄板の疲労試験方法として非常に有効であることが確認されている。また、有限要素法を用いたベローズの応力解析結果はベローズの疲労破損位置とよく対応づけられ⁽¹⁾、有限要素法で求められる応力値で寿命試験の結果を整理することは妥当であると考えられる。

本研究では、溶接ベローズの疲労寿命をベローズ用薄板材の疲労試験により推定する方法を検討するが、有限要素解析による応力振幅と溶接ベローズの寿命試験結果から得られる $S-N$ 曲線と薄板材の $S-N$ 曲線を比較する際、寿命試験における試験速度の差異につ

* 原稿受付 1995年1月9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)。*⁴ イーグル工業(株) (〒716 高梁市落合町阿部 1212)。

いても注意を払う必要があり、本論文では特にその影響を吟味した。

2. ベローズの寿命試験

2.1 試験方法と供試ベローズ 寿命試験は前報⁽¹⁾と同様、一定圧力下での伸縮作動試験およびバルブ閉取付長での圧力変動試験を実施した。試験装置の概略図を図1に示す。寿命試験装置は、供試ベローズを設置する圧力容器、ベローズを圧縮するための空気シリンダー、水圧ポンプとその配管系、およびベローズの破損を検知するための漏洩検出スイッチよりなっている。寿命試験は表1に示す条件で伸縮作動試験と圧力変動試験を実施した。試験圧力は、4 MPaとし、1山当たりの変位量は、0.5, 0.75, 1.0 mm/山とした。なお、試験温度は常温で行った。

供試ベローズの断面形状を図2に、寸法および仕様を表2に示している。供試ベローズは、板同士が密着可能なネスティング形であり、接液側にNi基合金Bを、非接液側に合金Aを配置した異種材溶接ベローズである。このベローズは重なり合う2枚の板(プレート)はそれぞれ同じ形であるが、波形形状が若干異なるプレート対を交互に配置しており、すべて同一形状

の一面形に対し二面形と称す。

供試ベローズ材、合金Aと合金Bの機械的性質と化学成分をそれぞれ表3と4に示している。機械的性質はベローズ完成品と同じ熱処理を実施したときのデータである。合金Bは合金Aに比べて機械的強度は劣るけれども、Cr, Moの含有量が多く、耐食性に優れた⁽⁵⁾材料である。

2.2 寿命試験結果 伸縮作動寿命および圧力変動寿命試験結果を図3に示す。伸縮作動寿命は1山あたりの変位量で整理し、圧力変動寿命は圧力で整理した。伸縮作動寿命は変位量大きくなれば、寿命が低下していくことがわかる。

Table 1 Fatigue test condition

Test Conditions	Repeated Displacement Test	Repeated Pressure Test
Test Pressure (MPa)	4.0	0.4~4.0
Set Length (mm)	16~21, 23.5, 26 (0.5, 0.75, 1.0 mm / 1 Conv.)	21 (0.5mm / 1 Conv.)

Table 2 Specifications of welded bellows

Items	Specifications
Fluid Contact Side Material No Fluid Contact Side Material	Alloy B Alloy A
Inside Dia. (mm)	17.45
Outside Dia. (mm)	30.15
Thickness / 1 Plate (mm)	0.127
Ply	Double
Convolutions	10
Shape of Plate	Fig. 2
Heat Treatment (K)	Solution; 1366 + Aging

Table 3 Mechanical properties

Items	Alloy A	Alloy B
Yield Strength (0.2% off set) (MPa)	1187	683
Tensile Strength (MPa)	1442	1096
Elongation (%)	17	37.6

Table 4 Chemical composition of test material

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

Fig. 1 Fatigue test apparatus

Fig. 2 Cross-sectional shape of one convolution

次に、寿命試験後の破損部の調査を行った。ベローズ内部を0.5 MPaの圧縮空気で加圧し、ベローズを水中に入れて気泡の発生により破損箇所を調べようとしたが、破損部分が非常に小さいために確認することができなかった。そこで、Heリークディテクタにて真空中に引きながらベローズの谷部1箇所ずつ揮発性のアセトン注入して破損穴をふさぐことにより破損山を見つけ出すことにした。そうして、そのベローズを8断面に切断して破損箇所を詳細に調べた。破損箇所が非常に小さいものがありすべての破損箇所を見つけ出したとはいえないが、観察された破損箇所のマップと代表写真を図4に示す。図中の破損箇所の数字はその位

(a) Repeated displacement test

(b) Repeated pressure test

Fig. 3 Fatigue test results

Fig. 4 Fracture points of welded bellows

置で破損したベローズの個数を示しており、一つのベローズでも破損箇所が2, 3箇所確認された場合もある。伸縮作動試験および圧力変動試験ともに内径溶接部近傍(A部)よりもベローズのプレート部(B, C, D部)のほうに多く破損が発見された。

3. 応力解析

3.1 溶接ベローズのモデル 一面形と二面形の溶接ベローズについての有限要素法による応力解析結果はすでに報告⁽⁶⁾しているが、本研究で対象とした二面形ベローズの場合のみ改めてここで参照する。溶接ベローズの要素分割は、図5に示したように2山分をモデル化した。分割要素は軸対称二次元モデルで、要素の一辺の中間に節点をもち一辺の変形の形状が二次方程式で示される二次要素を用いた。また、プレート同士の接触を模擬するために接触部にはギャップ要素⁽⁷⁾といわれるすきまが1 μm以下になった場合に節点間で力のみを伝達し、1 μm以上であれば力を伝達しない要素を用いた。ただし、接触部の摩擦力は考慮していない。圧力は変形に対して追従するフォロワー圧力⁽⁷⁾として与え、材料特性は弾性とし幾何学的非線形問題として解析を行った。解析は、圧力変動と伸縮作動を模擬する条件で行った。境界条件としては、図5に示すようにY方向(ベローズ中心軸方向)を拘束し強制変位を与え、X軸方向は自由とした。ここで、各材料の弾性係数、ポアソン比は表5に示すとおりであ

Table 5 Material properties of each metal

Items	Alloy A	Alloy B	Weld Bead
Elastic Modulus	192GPa	196GPa	194GPa
Poisson's Ratio	0.29	0.29	0.29

Fig. 5 Model for finite-element method

る。

3・2 解析結果 一般に、構造物が一定の荷重サイクルを受け、一定の弾性変形を繰返すとき、例えば局部的に塑性変形が生じるとしても当該局部は一定のひずみサイクルが繰返される状態にあるので、疲労試験で得たひずみ振幅に弾性係数を掛けこれを見かけの応力として、弾性挙動を仮定して計算された部材のピーク応力と直接比較できる⁽⁸⁾とされている。また、圧力変動試験においては圧力 0~4 MPa の繰返しであるが、伸縮作動試験においては圧力は 4 MPa 一定で強制変位が繰返し与えられる。よって最大応力値のみを見ても破損箇所を特定できない。そこで、今回計算した弾性ミーゼス応力振幅を算出するために修正グッドマン線図を用いる。平均応力を S_o 、応力の振幅を S_a 、材料の引張強さを S_u および材料の降伏応力を S_y とすると相当応力振幅 S_{aeq} は以下の式で表すことができる⁽⁹⁾。

$$S_{aeq} = \frac{S_a}{1 - \frac{S_o}{S_u}} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし、

$S_a + S_o \leq S_y$ のとき

$S_o' = S_o \quad (S_o \geq 0)$

$S_o' = 0 \quad (S_o < 0)$

$S_a + |S_o| > S_y$ のとき

$S_o' = S_y - S_a \quad (S_a < S_y, S_o > 0)$

$S_o' = 0 \quad (S_a < S_y, S_o < 0)$

$S_o = 0 \quad (S_a = S_y)$

式(1)では、平均応力の影響を引張応力と圧縮応力で分けている。しかし、ミーゼス応力のみでは引張応力か圧縮応力かはわからないので、応力強さの変動を求めるときと同様に主応力の分布状況を見て圧縮応力の場合にはマイナスを付けて区別した⁽⁹⁾。以上のようにして式(1)を用いて圧力変動時および伸縮作動時(0.5 mm/山)の接液側プレート(図4のA部)および非接液表面の相当応力振幅を求め、その結果を図6に示した。応力振幅の変化は各プレートの表面ごとについてプロットしている。まず、図6においてプレート同士が接触している位置では、変形が拘束されるために応力振幅が急激に変化しているのがわかる。圧力変動試験時におけるプレート面の応力振幅が大きい位置は、①プレート中央(図4のC部) ②外径溶接ビード寄りのプレート(図4のD部) ③内径溶接ビード近傍(図4のA部)であることがわかる。一方、伸縮作動試験時におけるプレート表面の応力振幅が大きい位置は、①外径溶接ビード寄りのプレート(図4のD部) ②内径溶接ビード寄りのプレート(図4のB部)であることがわかる。以上の結果は、図4に示した実際の溶接ベローズの破損箇所とよく一致する。さらに、割れ方向が板厚方向であることは、解析応力が曲げ応力が主であることも一致する。

4. 考 察

4・1 S-N 曲線 ベローズの最大相当応力振幅を縦軸に、横軸には溶接ベローズの寿命としてプロットした結果を図7に示す。なお、図7には、共振疲労試験機⁽⁴⁾で実施した合金Bの溶接ベローズ用薄板材

(a) Repeated displacement test

(b) Repeated pressure test

Fig. 6 Stress amplitude distribution on fluid-contact plates

Fig. 7 Fatigue curves of welded bellows and thin plate

の疲労試験結果も合わせてプロットしている。薄板材の疲労試験方法は前報⁽⁴⁾に報告したように試験片の変位が初期振幅の95%になったときを疲労寿命としている。溶接ペローズ用薄板材の疲労試験に用いた試験片の形状を図8に示す。試験片は、溶接ペローズ用薄板材からワイヤカット法により切出し、溶接ペローズ製作時と同じ洗浄および熱処理を行っている。板厚、熱処理条件、および表面粗さはまったく同一である。それにもかかわらず図7に示すように溶接ペローズの寿命曲線は、薄板の疲労曲線に比べてかなり低寿命であることがわかった。その原因として①疲労試験速度の影響、②応力波形の影響、③試験流体の影響等が考えられる。一般的に試験速度が速いときには疲れ強さがやや大きくなり、速度が遅いときには疲れ強さはやや小さくなるが示されている⁽¹⁰⁾。共振形の疲労試験速度は約4200 cpm⁽⁴⁾であり、一方溶接ペローズの寿命試験速度は約3 cpmと低速であることから図7の結果は従来の傾向と定性的に一致する。応力波形の影響については、高温下でクリープが起こる場合にはその影響は大きいことが示されているが⁽¹¹⁾、本研究における試験温度は常温であり応力波形の影響は少ないと考えられる。また、試験流体の影響については、使用した材料がNi基合金Bであり非常に耐食性に優れている⁽¹⁾ことからその影響は少ないと考えられる。

4・2 疲労試験速度と寿命の関係 薄板の疲労試験結果と溶接ペローズの寿命結果が一致しないのは疲労試験速度の影響によるものではないかと考えられる。そこで、疲労試験速度と寿命の関係を把握するために以下に示す薄板材の疲労試験を行った。

4・2・1 疲労試験装置と方法 共振形疲労試験機では試験速度を遅くすることは困難であるので、新たに片持ばり状態で強制的に曲げ応力を与えることができる平面曲げ試験装置を製作した。その試験装置の概

Fig. 8 Shape and dimensions of thin plate specimen

要を図9に示す。試験装置は、①マイクロメータで移動可能にしてある試験片取付台、②試験片に曲げ応力を与えるための2本のロッド、③そのロッドを上下させるための空気圧シリンダ、および④空気圧シリンダを制御するためのタイマと電磁弁より構成されている。空気圧シリンダを上下させることによりロッドが試験片を強制的にたわませる。この装置による試験片の測定変位は、両振幅で6.0 mm、片振幅で3.0 mmである。試験片に発生する曲げ応力は、試験片取付台をマイクロメータにより移動させることで変更可能である。試験片は共振形疲労試験に用いたものと同じ薄板試験片を用いた。試験片の材質は合金AおよびBで、溶体化熱処理温度は1366 Kとした。

クラック発生寿命は薄板の共振形疲労試験方法と同じ基準で判断する必要があるので、薄板の共振形疲労試験片において振幅が初期値の5%低下したときの固有振動数を測定した。初期の固有振動数が69.9 Hzの試験片において、振幅が初期値の5%低下したときの固有振動数を測定したところ65~66 Hzであり、クラックが発生していることを確認した。よって、平面曲げ試験においては、ある疲労回数ごとに試験片を取外し固有振動数を測定して66 Hz以下になった時点を疲労クラックの発生回数とした。疲労試験は、溶接ペローズの寿命試験時の試験速度を模擬するために1分間に3サイクルの試験速度からこの平面曲げ試験装置で最も速くできる1分間に150サイクルの試験速度範

Fig. 9 Plane bending fatigue test apparatus

Fig. 10 Fatigue test wave forms

図で行った。平面曲げ疲労試験機と薄板の共振形疲労試験機の応力波形は図 10 に示すようであり、試験装置の構造上平面曲げ疲労試験機では応力波形は台形波となり、溶接ペローズの試験条件とほぼ同じである。

4・2・2 疲労試験結果 合金 A および B の応力振幅 (S_a) が 730 MPa における試験速度と疲労寿命との関係を図 11 に示す。なお、試験速度が 2 750 cpm のデータは、薄板の共振形疲労試験において試験片の先端におもりを接着して固有振動数を低下させたものである。この結果から合金 A、B ともに試験速度が遅くなれば着実に疲労寿命が低下することがわかる。また、その疲労寿命は疲労試験速度が 60 cpm 以下ではほとんど一定の値となることも確認される。合金 B について、溶接ペローズの寿命試験と同程度の試験速度 (3 cpm) における薄板の疲労寿命が、薄板の共振形疲労試験 (4 200 cpm) の寿命の約 1/6 になることが確認され、図 7 に示された実際の溶接ペローズの寿命曲線と薄板の共振形試験機での疲労曲線の相違は、試験速度が影響していると判断できる。また、合金 A については、3 cpm 時の疲労寿命は 4 200 cpm 時の疲労寿命の約 1/4 になっている。

応力波形とひずみ波形には、応力が急上昇して一定値を持続するとき、その応力が材料の静的な上降伏点を越える場合でも、ひずみのほうは応力に対応する点まで弾性的に急上昇した後、平坦部が現れ、時間 T だけ遅れて降伏ひずみが始まることが知られている⁽¹²⁾。また、炭素鋼の場合の下降伏応力はひずみ速度依存性があり、かつひずみ速度が 1 s^{-1} 以下では降伏点があり低下しない⁽¹²⁾ ことがわかっている。このように塑性ひずみの発生には時間的な遅れが伴うので、繰返し速度の上昇により応力の作用時間が短縮すると、同じ応力でも発生する塑性ひずみ量が減少し、1 サイクルあたりの疲労損傷が減少するため寿命が伸びると考えられる。さらに、ひずみ速度が 1 s^{-1} 以下では降伏点があり低下しないという結果は、図 11 において試験速度が 60 cpm (1 s^{-1}) 以下では、疲労寿命は

Fig. 11 Relationship between fatigue test speed and cycle life of thin plate

ほとんど一定の値であることとよく一致する。

また、試験速度と疲労寿命の関係について、山根⁽¹³⁾は微視的な見地から考察し粘弾性モデルを用いれば、理論的に疲労寿命は試験速度の二乗に比例し、実際の試験結果とも一致することを明らかにしている。ただし、試験速度が 200 c/s (12 000 cpm) より速い範囲であり、逆に試験速度が 200 c/s の試験結果は二乗の近似曲線よりも変化が緩やかになることも示されている。図 11 の試験結果は、山根が示した試験速度より遅い範囲であり、さらにそれ以上試験速度を遅くしても疲労寿命が変化しない領域を含んでいることを考えると、疲労寿命は試験速度の二乗よりも緩やかな傾きになることも妥当であると考えられる。

4・2・3 同一試験速度での疲労寿命曲線 次に、溶接ペローズの寿命試験時とほぼ同じ試験速度である 3 cpm、試験波形は図 10 に示した台形波で行った平面曲げ試験において、応力を変化させた場合の疲労寿命曲線を図 12 に示した。なお、図 12 には、有限要素法で計算された応力振幅に対する溶接ペローズの寿命試験結果および薄板の共振形疲労試験結果も合わせて示している。この結果から、今回実施した平面曲げ疲労試験結果 (試験速度 3 cpm) は、溶接ペローズの寿命試験結果とよく一致することが確認できる。また、平面曲げ疲労試験結果は、合金 B の場合、薄板の共振形疲労試験結果の 1/6 程度になることがわかる。以上の検討結果より、薄板の共振形疲労試験装置で作成した $S-N$ 曲線 (試験速度 4 200 cpm) と溶接ペローズの寿命試験結果 (試験速度約 3 cpm) が相違するのは、疲労試験時の速度の影響であることがわかった。さらに、同程度の試験速度で薄板の疲労試験を行った合金 B の $S-N$ 曲線は、接液側に合金 B を配した溶接ペローズの $S-N$ 曲線とよく一致することが確認でき、溶接ペローズに負荷される応力を有限要素法を用いて正確に求めることにより、溶接ペローズの寿命推定ができることが確かめられた。

Fig. 12 $S-N$ curves against each fatigue test speed

Fig. 13 S-N curves of welded bellows made of Alloy B

4.3 推定疲労寿命曲線 以上検討した結果、薄板の共振形疲労曲線とペローズの寿命曲線の相違は試験速度の影響が非常に大きい。よって、接液側に合金 B を配した溶接ペローズの寿命試験速度が 60 cpm 以下の場合におけるペローズの疲労寿命を推定する場合には、合金 B の薄板の共振形疲労曲線を寿命で 1/6 にした曲線を用いることにより推定可能である。同様に、合金 A の場合には薄板の共振形疲労曲線を寿命で 1/4 にした曲線を用いることでペローズの寿命推定が可能になると考えられる。また、実際の設計においてはさらに余裕を見て、Langer が提唱した設計曲線⁽¹⁴⁾ (薄板の共振形疲労試験機で求められた曲線の寿命で 1/20 と応力振幅で 1/2 の曲線の小さいほう) で評価するほうが安全である。以上の考察のもとに、接液側が合金 B で製作された溶接ペローズ用推定疲労寿命曲線および設計曲線を材料の最適疲労曲線とともに図 13 に示した。

5. 結 言

(1) 疲労寿命は、試験速度が大幅に相違する場合には影響があることが試験で確認された。特に、薄板の共振形疲労試験速度 (4 200 cpm) と溶接ペローズの疲労試験速度 (3 cpm) における合金 B の薄板の疲労寿

命を比較すると、試験速度が 3 cpm の場合の疲労寿命は試験速度が 4 200 cpm の場合の疲労寿命の 1/6 になることがわかった。また、薄板の疲労試験において、試験速度が 10 cpm 以下では疲労寿命がほぼ一定値になることも確認された。

(2) 有限要素法を用いて解析した溶接ペローズの応力振幅と溶接ペローズの寿命の関係 (S-N 曲線) は、溶接ペローズの寿命試験と同一の試験速度で行った薄板の S-N 曲線とよく一致する。つまり、疲労寿命を正確に求めるためには、疲労試験速度の影響を考慮する必要があることがわかった。

(3) 疲労寿命と試験速度の関係を把握することにより、接液側が合金 B で製作された溶接ペローズの寿命推定曲線として薄板材の共振形疲労試験結果 (試験速度 4 200 cpm) を寿命で 1/6 にした疲労曲線を作成した。以上の曲線より、溶接ペローズの応力を有限要素法にて正確に求めておけば、溶接ペローズの寿命を精度よく推定することができる。

文 献

- (1) 平田・中島・岡田・藤井・佐藤, 機論, **60**-571, C(1994), 1039.
- (2) 末藤, バルブ技報, **8**-2(1993), 43.
- (3) 竹園, 配管技術, **13**-1(1971), 84.
- (4) 平田・中島・岡田・小川, 機論, **61**-581, C(1995), 174.
- (5) 服部・ほか 4 名, 腐食防食協会春期学術講演大会予稿集, Vol. 1983(1983), 17.
- (6) 平田・中島・岡田・佐々木・小川, 機論, **61**-587, C(1995), 3143.
- (7) NISA II User's Manual, EMRC (1991), 4.49-5., 7.3-7.
- (8) 鶴戸口, 高圧ガス, **24**-1(1987), 14.
- (9) 日本機械学会編, 疲労強度の設計資料 IV (改訂第 2 版), (1982), 206.
- (10) 日本学術振興会第 129 委員会, 強度および疲労資料集成, (1970), 3, 丸善.
- (11) 北村・新田・桑原, 電力中央研究所報告, No. 282054(1983).
- (12) 菊川・大路・小倉, 機論, **32**-238(1966), 875.
- (13) 山根, 機論, **30**-215(1964), 772.
- (14) Langer, B. F., *Trans. ASME, Ser. D, J. Basic Eng.*, **84** (1962), 389.