弁ばね用材料の回転曲げ疲労に及ぼす要因*

Effect of Processes on Rotating Bending Fatigue Strength of Si-Cr Valve Spring Wire

小曾根 敏夫**・土方 直樹**

Toshio OZONE・Naoki HIJIKATA

弁ばね用材料の疲れ強さの評価は、一般に素線においては中村式回転曲げ疲れ試験により評価する場合が多い。しかし回転曲げ疲れ試験と星型ばね疲れ試験は、折損形態の違いから考えると回転曲げで得られた結果をそのまま、ばねの疲れ強さに置き換える訳にはいかならないと思われる。そこで本報では、中村式回転曲げ疲れ試験機により、SWOSC-Vを用い、加熱温度と、ショット投射時間を変えて実験を行なった結果、回転曲げ疲れ強さは、引張強さと表面粗さに大きく支配されることがわかった。

Rotating bending fatigue test (of Nakamura type) is usually applied to valve spring wires to estimate the fatigue strength, but it seems difficult to use it for the evaluation of fatigue strength of valve springs, for fatigue characteristics seen in wires and springs are quite different. This paper presents effects of annealing temperatures and shot peening operation on the rotating bending fatigue strength of Si-Cr oil tempered wire to conclude that the fatigue strength of the wire is strongly affected with its tensile strength and surface roughness.

1. まえがき

最近の弁ばねは、自動車エンジンの小型化・高出力化に伴い、高応力下における高い耐久性が求められてきている。その高い耐久性は、各種疲れ試験によって初めて裏付けられるものである。現在、疲れ試験は、ばねでは星型ばね疲れ試験、素線状態では回転曲げ疲れ試験がその代表として広く用いられている。回転曲げ疲れ試験は、星型ばね疲れ試験に比べ、試験速度が速く、操作も単純なため、材料評価には欠くことのできない試験法となっている。一般に回転曲げ疲れ試験用供試材は、弁ばねに施す処理条件と同じ条件で、処理する場合が多い。しかし、弁ばねには最適と思われるこれら処理条件も、回転曲げ疲れ試験では、試験条件(回転曲げ疲れ試験は両振り)や折損形態から考えると、必ずしも最適な処理条件とは言いがたい。

今回は、弁ばね用材料の中でも、耐久性に特にすぐれているSWOSC-V(弁ばね用シリコンクロム鋼オイルテンパー線)について、中村式回転曲げ疲れ試験により、低温焼鈍温度やショットピーニング条件を変えることにより、回転曲げ疲れ試験に及ぼす諸条件の影響について調べ、回転曲げ疲れ試験における供試材の最適処理条件を明らかにすることを目的とする。

2. 供試材及び実験方法

実験に用いたSWOSC-Vは、 $\phi 4.0$ mmで化学成分を表1に示す。

図1に、今回実験に用いた供試材の組織を示す。組織は良好なソルバイトを呈し、表面に特に、脱炭などの異常は、認められなかった。

供試材は、それぞれ表2に示す工程で作成した。オイルテンパー線をすべて、650 mmに切断した後、一次

表1 供試材の化学成分(%)

SWOSC - V	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	引張強さ
	0.550	1.45	0.68	0.005	0.004	0.01	0.68	198 kgf/mm ²

原稿受付日 昭和62年12月25日

* ばね技術研究会 昭和61年度秋季講演会にて発表

** 中央発條株式会社 (Chuo Spring Co., Ltd.)

図1. 供試材の組織

表2 供試材処理工程

一次低温焼鈍 (℃×30分)	ショット投射速度 (m/s)	二次低温焼鈍 (℃×20分)
As O.T.	74.4	—
200	↑	200
300	↑	↑
400	↑	↑
420	37.2	↑
↑	↑	300
↑	↑	400
↑	74.4	200
↑	↑	300
↑	↑	400
↑	124.0	200
↑	↑	300
↑	↑	400
450	74.4	200

低温焼鈍・ショットピーニング・二次低温焼鈍と言う、一般の弁ばねの処理工程と同じ工程で作成した。

一次低温焼鈍は、As O.T.～450℃、ショット投射速度は、37.2 m/s～124.0 m/s、二次低温焼鈍は、200℃～400℃に変化させた。ただし、一次低温焼鈍温度を変えた供試材についてはショット投射速度 74.4 m/s・二次低温焼鈍 200℃に固定し、疲れ強さに対する硬さの影響を調べた。また、ショットピーニング・二次低温焼

鈍温度を変えた供試材については、一次低温焼鈍温度 420℃(現行弁ばね処理温度)に固定し、表面粗さ及び、残留応力の影響について調べた。疲れ試験は、 10^7 回における平均疲れ強さを算出すべく、修正ステアケース法に基づいて試験を行った。

3. 実験結果

3.1 一次低温焼鈍と疲れ強さ

一次低温焼鈍温度が、回転曲げ疲労における疲れ強さにどのような影響を与えるかについて調べた。

図2に、低温焼鈍温度と硬さの関係を示す。硬さは低温焼鈍温度350℃までは若干、上昇し、それ以上の温度では、大きく低下している。

ここで、一次低温焼鈍温度をAs O.T.~450℃まで変化させた場合の回転曲げ疲れ試験での疲れ強さを示す。図3は、低温焼鈍温度と疲れ強さの関係を表したもの

である。ショット投射速度は74.4 m/s、二次低温焼鈍はAs O.T.以外の供試材については200℃で20分間施行してある。

疲れ試験の結果、一次低温焼鈍温度300℃までは、疲れ強さは、ほぼ一定であり400℃以上になると大きく低下することがわかった。これは、図2に示す低温焼鈍特性と同じ傾向を示している。

そこで図4に、素線の硬さと疲れ強さの関係を示す。

この結果、硬さと疲れ強さは、ほぼ比例関係にあることがわかる。

3.2 ショットピーニングと疲れ強さ

ショットピーニングは、疲れ強さを向上させる上で有効な処理である。これは、素材表面に圧縮の残留応力を形成し、繰り返しにおける実働応力を緩和するためである。しかし、ショットピーニングは、圧縮残留応力を形成する一方、素材表面を荒らすという逆効果にも成り得る。ここでは、ショット投射速度を、37.2 m/s, 74.4 m/s, 124.0 m/s と変え、表面粗さ及び残留応力を変え実験を行った。

図5に、表面粗さの実測例、図6に、ショット投射速度と粗さの関係を示す。ショット投射速度が増すに従って、十点平均粗さ(R_z)、最大高さ(R_{max})ともに増加している。

図5. 表面粗さ実測例

図7. ショット投射速度と疲れ強さ

図6. ショット投射速度と表面粗さ

次に図7・8にショット投射速度・粗さと疲れ強さの関係を示す。図中の温度は二次低温焼鈍温度を示している。ここでは、疲れ強さは、ショット投射速度、表面粗さが増大するに従い、低下している。

図8. 表面粗さと疲れ強さ

また、残留応力と疲れ強さの関係についても調べた。ここでは、供試材へのショット投射速度を 37.2 m/s ~ 124.0 m/s とし、二次低温焼鈍温度を、200℃ ~ 400℃ と変え、それぞれ同じ表面粗さで残留応力分布を変化させた。図 9 に、ショット投射速度の違いによる残留応力分布の変化を示す。ショット投射速度が速くなるに連れ残留応力分布のピークの位置が表面より深くなっている。また、最表面における圧縮残留応力は、ショット投射速度が遅い方が高く、投射速度が増すほど低下している。これは、ショット投射速度が速くなると圧縮残留応力のピークは深くなるが、投射速度が遅いものに比べ、表面付近の塑性変形量が大きくなり、最表面では逆に残留応力が低くなるためであると考えられる。

図9. 残留応力分布

図 10 に、二次低温焼鈍温度と、表面の圧縮残留応力の関係を示す。ここでは、処理温度が高くなるに連れ、圧縮残留応力の低下が認められる。これは、加熱による残留応力の解放によるものと考えられる。

図10. 表面残留応力値

図11. 二次低温焼鈍と疲れ強さ

これらの結果を基に、図 11 に疲れ強さとの関係を調べた。二次低温焼鈍温度が高くなるに従い、表面の圧縮残留応力が低下し、疲れ強さも低下している。またショット投射速度が遅いものほど、疲れ強さは高くなる。従って、中村式回転曲げ疲れ試験に関しては、表面粗さが小さく、表面の圧縮残留応力の高いショットピーニングが有効である。これは、回転曲げ疲れ試験が両振りのため、供試材の最表面の状態(粗さ・残留応力)の影響度が大きくなるためと思われる。

3.3 折損破面

図 12 に、折損破面の一例を示す。破面観察の結果、供試材はすべて材料表面を起点として折損しており、

介在物による折損は認められなかった。

図 12 において、左側の破面は応力が高く (83.0 kgf/mm^2) 早期 (2.81×10^5 回) にて折損したもの、右側の破面は、応力が低く (81.5 kgf/mm^2) 長寿命側 (1.553×10^7 回) で折損したものの例である。

早期に折損したものは、表面から放射状にき裂が進行し、折損に至るまでの繰返し数が多くなるにつれき裂は、ショットピーニングの効果により、渦を巻く形で進行する。また 10^7 回付近の長寿命で折損したものについては、表面からせん断クラックが入った後疲労き裂が進行することがわかった。

図12. 折損破面例

4. まとめ

中村式回転曲げ疲れ試験による疲れ強さ評価の結果以下のことがわかった。

1) 疲れ強さは、材料の硬さ(引張強さ)に比例する。そのため、回転曲げ疲れ試験では、通常弁ばねに施行する一次低温焼鈍 (420°C) より低い温度 (350°C 以下) で施行することにより高い耐久性が得られる。

2) 回転曲げ疲れ試験用供試材は、その折損形態(表面起点)から、弁ばね状態に比べ表面の荒れの感受性が

高く、ショットピーニングによる表面の荒れは、弁ばねより大きく疲れ強さ低下につながる。従って今回の実験では投射速度の最も遅い、表面粗さの小さい 37.2 m/s のものが疲れ強さが高い結果となった。

3) 二次低温焼鈍は、 200°C で処理したものが、疲れ強さが最も高く、 300°C 、 400°C になると圧縮の残留応力の減少により疲れ強さは急激に低下する。