振り加工を施した螺旋ばねの研究 (第3報) 鋼線ばね*

三 戸 曉**

Satoru Mito: Studies on the Helical Spring Made of Twisted Wire (3rd Report). Steel Wire Springs. In this experiment the effects of pretwisting on the elastic and the fatigue strength of several cold drawn steel wire springs were examined. The specimen used for testing was a helical tension spring, 8~9 mm ϕ and 7~11 turns. It was clarified that the elastic and the fatigue limits of these springs increase 50~100 % and 20~40 % respectively by applying the pretwisting process, while the spring constant (Modulus of Rigidity) decreases several percent. The optimum blueing temperature for twisted specimens was about the same as that for not twisted ones or slightly lower.

(Received February 18, 1955)

I. 緒 言

前報⁽¹⁾において振り加工を施した螺旋ばねに見られる種々の基礎的諸現象について考察した結果を述べたが、本報告ではさらにこの方法を一般の螺旋ばね材料中最も重要な材料である各種の鋼線、ピアノ線ばね等に適用した結果について述べた。従来引拔鋼線、硬鋼線についての研究⁽²⁾は比較的多いが、これらのばねについての研究は割合少く、特に本報告で示すような低級な素材線に振り加工を施して高級ピアノ線ばねに匹敵する強力な螺旋ばねの得られることについては未だ報告がないように見える。

II. 試料および試験方法

1. 素材線

素材線は何れも市販のもので、軟鋼線、普通鋼線および3種類のピアノ線でその化学分析値および機械的性質の値を Table 1, 2 に示した。なお機械的性質の中硬度は微小硬度計 (荷重 50 g) により求めた表面の硬度である。

Table 1 Chemical analysis of wires used

Elements (%)	C	Si	Mn	P	S
Mark					
0.1C	0.13	0.19	0.43	0.017	0.032
SW2	0.60	0.19	0.52	0.011	0.026
SWP1	0.71	0.08	0.42	0.008	0.022
SWP2	0.81	0.17	0.39	0.011	0.009
SWP5	0.81	0.28	0.32	0.018	0.016

** 東芝マツダ研究所

* 1951年10月本會神戸大會および1953年10月本會仙臺大會に發表

(1) 著者, 本誌, 19(1955), 453; 456.

(2) F. C. Lea, R. A. Batey, Pro. Inst. Mech. Eng., II(1928), 865; E. T. Gill, R. Goodacre, J. Iron Steel Inst., 130(1934), 293; 132(1935), 143; H. J. Godfray, Trans. A. S. M., 29(1941), 133; 鋼金; 鐵と鋼, 18(1932), 261; 虎岩, 鐵と鋼, 29(1943), 614; 俵, 福地, 鐵と鋼, 29(1943), 518; 永田, 鐵と鋼, 29(1943), 12; 渡瀬, 矢野, 本誌, 6(1942), 437; 作井, 本誌, 11(1947), 3; 高橋他四氏, 本學會分科會報告, IX(1952), 86.

Table 2 Mechanical properties of wires used.

Specimen	Diameter (mm)	Tensile Strength (kg/mm ²)	Surface Hardness (Hv)	Torsion value (100d)
0.1C	0.597	98.8	298	42
SW2	0.560	174	393	37
SWP1	0.589	201	423	36
SWP2	0.539	240	540	34
SWP5	0.559	270	548	22

2. 螺旋ばね

上記各種の線を使用し前報⁽¹⁾において述べた方法によつて螺旋ばね (引張用) を作った。これらのばねは芯金から外した際各線の引拔加工度に應じた弾性的恢復のために同一芯金を使用してコイル捲きする場合にはコイル徑に相異を生ずる。振り加工しない普通のばねでは芯金の約 50% 前後, 振り加工したばねでは約 20% 程度のコイル徑の膨張がある。本實驗では芯金の直徑は振らないものには 6.01 mm, 振り加工したものには 7.11 mm のものを使用し仕上りのコイル徑は 7.20~8.89 mm であつた。捲数は線徑, コイル徑などによつて異なり大體 7~11 のものを使用した。また疲労試験の試料ではこれに加わる應力を加減するため捲数をやゝ加減して使用した場合もある。試験片数は弾性限の測定には 2~4 本, 疲労限の測定には 10~20 本程度使用し, 熱處理後前者においては数日以内に後者においては 1~2 ケ月の範囲で試験を完了せしめた。

3. 試験方法

前報⁽¹⁾に述べたと同様の方法によつてばねの弾性限および疲労限を測定した。また剛性率の測定には試料の両端のコイルの部分を除いて荷重伸線圖を求め, この直線部分から算出した。

III. 結 果

1. 弾性限

(1) 低温焼鈍處理による影響

螺旋ばねをコイル形成後低温焼鈍することはばねの Blueing 處理として古くから知られており, これは主としてコイル捲きの際の加工歪の除去を目的とするものであることは既に述べたが⁽¹⁾, これによつて鋼線ばねの弾性限

は何れも約2~3倍程度上昇する。Fig. 1 には一例として普通鋼線および5号ピアノ線ばねにおいて種々の振り加工を施したものおよび振り加工のない普通のばねについて、低温焼鈍による弾性限の変化の様子を示した(加熱時間各10 min)。この弾性限最高となる焼鈍温度は針金の引拔加工度、振り加工度等によつてもある程度影響されるが最も影響するのは素材線中のC量であり軟鋼線では一般に高く(450~500°)高炭素鋼になるにつれて低くなる(250~300°)。加熱時間は普通鋼線ばねについての測定結果では振り加工のない普通のばねで300°で10~60 min、振りばねでは300°で10~30 minが最適であつた。他の鋼種についても大體同様であると思われる。

Fig. 1 Changes in elastic limit of steel wire springs by low temperature annealing.

(2) 振り加工度との関係

軟鋼線、普通鋼線およびピアノ線ばねにおいて0.8, 1.7, 3.3 6.6t/cm等の振り加工(振りつムコイル形成)を施し、

Fig. 2 Effect of twisting work on the elastic and fatigue limit of several steel wire springs.

これによる各ばねの弾性限の上昇の程度を求めるとFig. 2に示すような結果が得られる。なお各ばねともBlueing処理を施し最高の弾性限値をとつてある。この際各試料の線径はそれぞれ若干異なるゆゑ厳密にはこれらを同一の圖に描くことは出来ないわけであるが、大體の傾向としてはこれは圖の

ような関係にあるといつてよいであろう。圖に明らかなように硬鋼線ほど振り加工による効果は大きい。これらの振り加工によつて弾性限は大體50~100%程度上昇することが知られる。

2. ばね常数

ばねでは弾性限、疲労限等の機械的強度の他にばね常数、すなわち振れの弾性率の値も重要な性質である。金屬の弾性率が加工によつて變化することについては從來種々の研究があり、特にピアノ線の剛性率の加工による變化については作井博士の系統的な研究⁽³⁾がある。また加工した線材の剛性率の低温焼鈍による變化については山本、武井氏らの報告⁽⁴⁾があり、實際のばねについての例は虎岩氏の報告⁽⁵⁾に見られる。これらは何れも伸線加工およびその焼鈍による剛性率の變化を調べたもので、これに振り加工を施したものについて測定された例はないように見える。Fig. 3

Fig. 3 Changes in modulus of rigidity of a steel wire twisted and not twisted by low temperature annealing.

に一例として普通鋼線の各種試料における測定値を示した。圖に示すように振り加工した場合にはその剛性率は大體數%低下する。また振り加工の與え方の相異によつてもこの値はかなり相異し振りつムコイル巻きした試料について測定したものは

最も低い値を示した。焼鈍によつて剛性率の上昇する傾向は振り加工の有無に拘らず大體同傾向を示し250~300°附近の焼鈍で何れも略々恢復を示しその恢復の程度は5~10%程度である。このような傾向は他の鋼種についても全く同様であつた。

3. 疲労強度

金屬の疲労強度に對する加工の影響としては從來種々の研究があるが、これらの中ばねの疲労強度に比較的關係あるものとして西原博士らによる鋼材の振り疲労強度におよぼす振り加工の研究⁽⁶⁾がある。これによると鋼材に豫め振り加工を施すことによりその疲労強度は著しく増加することが報告されている。従つて本研究で意圖したようなばねの素材線に振り加工を施したものは、ばねとしての疲労限も普通のものより高いものが得られることが豫想される。

(3) 作井, 科研報告, 2(1950), 85.

(4) 山本, 武井, 本誌, 16(1952), 128; 17(1953), 161.

(5) 虎岩, 前出.

(6) 西原, 河本他二氏, 機械學會論文集, 14(1948), 110.

しかしばね形成後の prestressing によつては疲労限は殆ど上昇しないことは著者⁽¹⁾および河本博士ら⁽⁷⁾によつても既に述べられている。以下には各種の鋼線ばねについて種々の振り加工を施した場合、その疲労強度にいかなる影響をおよぼすかについて調べた結果を述べた。一般に金属の疲労試験においてはその疲労限以上での試験値はかなり散乱するが、疲労限附近では散乱しなくなるようであるが⁽³⁾螺旋ばねの試験においても略く同様であつた。また S~N 曲線の折点は振り加工度の大きいものほど早く (数 10 萬回) 現われる傾向が見られた。なお各ばねにおける疲労破壊の様子は振り加工を施さない普通のばねでは従来観察されているように針金の縦軸方向の割れに沿つて起ることが多かったが、振り加工を施したものでは主として針軸に垂直な面における剪断應力による破壊の様子を示す例が多かつた。また破断の起る場處は荷重の大きな場合は端から 1/2 巻目附近のことが多く、荷重の小さい場合には必ずしも端で破断するとは限らずその場處についての規則性はないように見えた。

(1) 振り加工度との関係

既報⁽¹⁾のようにばねの疲労限は弾性限最高となるような低温焼鈍処理によつて最高となり、また餘り大きな初張力は疲労限に對して有害である。従つて以下の試験においては軟鋼線、普通鋼線、およびピアノ線ばねに種々の振り加工を施しコイル形成後これに最適の低温熱処理を施し、かつ振りばねでは初張力は 10 kg/mm^2 以下となるようにさらに prestressing してこれらについて S~N 曲線を求めた。2 號ピアノ線および 5 號ピアノ線ばねにおける結果の例を Fig. 4 に示した。圖に見られるように振り加工を施

Fig. 4 S~N curves of piano wire springs pretwisted and not twisted.

したものではその疲労限のみならず疲労限以上の應力に對しても、その破断迄の壽命は普通のものに較べてやゝ大きくなつてゐる。各試料についてのこれらの疲労限値と素材線に與えた振り加工度との關係は Fig. 2 中に示した。これから明かなように振りの効果は弾性限における同様疲労限

においても硬鋼線ほど大きい。これらの結果から大體破断捻回値の半數程度の振り加工を與えることによつてその疲労限は 30% 前後上昇することが知られる。

(2) 繰返し荷量による變形

Lea 氏の實驗⁽⁹⁾ではばねのへたりは繰返し應力の初期に著しく以後は比較的少ないことが報告されている。本實驗においてもほぼ同様であつた。大體硬鋼線では疲労變形は極めて少く、また振り加工したものは普通のものに較べて同様に少なかつた。軟鋼線および普通鋼線についての測定の例を Fig. 5 に示した。

Fig. 5 Creep curves for repeated loading.

(3) 酸による腐蝕の影響

鋼線、ピアノ線などに振り加工を施すとその振り加工度が大きくなるにつれて加工傷の發生することが豫想される。このような状態のものに薬品が作用する場合はその傷の部分は特に腐蝕され易く、このため傷の部分の切欠効果によつてその疲労限は著しく低下する危険がある。このため本實驗ではさらにこれらのばねに對する酸の腐蝕の影響について次に調べた。普通鋼線について 1.7 t/cm (振りつゝコイル巻き) 4 t/cm (コイル形成前振り) の振り加工を與えたものおよび振り加工を施さない普通の試料を作り各 $300^\circ \times 10'$ 熱處理後 10% H_2SO_4 溶液に浸漬して後疲労試験を行つた。なおこの中振り加工のないものおよび 4 t/cm の振り加工のものは $18 \sim 22^\circ$ の液中に 24 hrs 浸漬したものでこれによる線径の減少はそれぞれ 0.003 および 0.005 mm で、 1.7 t/cm 、振り加工のものは $26 \sim 28^\circ$ 中 26 hrs 浸漬し、その線径の減少は 0.034 mm であつた。この試験の結果は Fig. 6 に示すようにに腐蝕によつて見掛けの疲労限は低下し、その低下度は振りのないばねは 9.5% 1.7 t/cm 振りのばねは 13.8%, 4 T ばねは 25.3% となつており振り加工を施したもののほどその低下度は大きい傾向にある。なおこの中 1.7 t/cm 振り加工のものは他の場合に比し腐蝕條件がやゝ異り、線径の減少が大きかつたが、この線径の減少を考慮して眞の疲労限を算出すると約 70 kg/mm^2 の値となり、これは腐蝕前の値と大差ない。

(7) 河本, 櫻井, 藤谷, 材料試験, 3(1954), 443.

(8) R. Cazand, Fatigue of Metals, (1953), 54.

(9) F.C. Lea, F. Heywood Pro. Inst. Mech. Eng., I(1927), 403.

また次報で述べるように不銹鋼線ばねにおいては酸で腐蝕

Fig. 6 Effect of corrosion by 10% H_2SO_4 sol. on the fatigue strength of steel wire springs.

疲労限は薬品の腐蝕などによつてそれほど影響はされないといつてよいように思われる。

(4) 一定初荷重下における繰返し疲労試験

以上の実験はすべて應力 σ から一定の應力範囲への繰返し疲労試験結果であるが、ばねにおいては一定の初荷重が加わる状態で使用されることが多いのでさらにこれについて次に検討した。この結果は上述の結果と大差なく、例えば普通鋼線ばねの一定の初荷重下 ($21 \sim 26 \text{ kg/mm}^2$) での疲労試験結果では 3.3 t/cm のものの疲労限は 86 kg/mm^2 、振り加工のないものの疲労限は 70 kg/mm^2 で振り加工したもののほうが 23% 疲労限が大きい結果が得られた。

4. 素材線の機械的性質との関係

以上の螺旋ばねについて得られた弾性限および疲労限の値 (何れも熱処理後の値) とその素材線の抗張力との関係を圖に示すと Fig. 7 に示すような関係が得られる。素材線の抗張力は線引のまゝの状態の値をとつたが、これは熱

Fig. 7 Relation between the elastic and fatigue limit of steel wire springs and the tensile strength of the wire.

はその素材線の強度にほぼ比例して大きくなるが、疲労限の方は素材線の強度の上昇につれてある程度飽和して来る傾向にあることが知られる。従来ピアノ線ばねの疲労限として知られている値は大體 $50 \sim 60 \text{ kg/mm}^2$ (10) 程度であり

すなわち本試験において振り加工のない普通のばねについて得られた圖示するような値と大體同程度の値である。従つてこれ以上ばねの疲労限を増大させるためにはその抗張力が高く、しかも疲労強度も高いような強力な素材線を用いなくてはならず、このためにはさらに優れた伸線技術が必要とされるのではなからうかと思われる。これに對して振り加工法による場合には素材線に振り加工を與えつゝコイル形成するという比較的簡単な行程によつてばねの強度は著しく上昇し、例えば普通鋼線にこの方法を應用することによつて圖から明らかなように抗張力 350 kg/mm^2 程度の高級ピアノ線ばねにも匹敵するばねが得られるもののである。

IV. 結 論

以上軟鋼線、普通鋼線およびピアノ線ばねに振り加工を施した場合、その弾性限疲労限等におよぼす効果について述べたが、これらの結果を要約すると次のようになる。

(1) 螺旋ばねの最適焼鈍温度は主として組材線中のC量によつて異なり、軟鋼線ほど高く (500° 前後) 高炭素鋼線ほど低い ($250 \sim 300^\circ$) 加熱時間は $10 \sim 30 \text{ min}$ 位が適當である。

(2) 振り加工を施したものの最適焼鈍温度はこれと同じ位か或いはやや低目 (50° 位) である。

(3) 低温焼鈍によつてこれらのばねの弾性限は 2~3 倍上昇するが熱処理後のものについて比較すると振り加工したものは普通のものに較べてその弾性限は 50~100%、疲労限は 20~40% 上昇する。

(4) 振り加工により線材の剛性率は低下する。振りつゝコイル巻きしたものはその剛性率は最も低い。低温焼鈍によつて 5~10% 程度上昇するが、その傾向は振りの加工の有無にかゝらず大體同程度である。

(5) 螺旋ばねの強度に對する振り加工の効果は鋼種によつて異なり硬鋼線は最も大きい。

(6) 疲労變形は一般に少く、特に硬鋼線ばねおよび振り加工したばねでは少い。

(7) 酸の腐蝕によつてこれらの螺旋ばねの疲労限は一般に低下するが、振り加工度の大きいものはその低下度はやや大きい。

(8) 螺旋ばねの弾性限は素材線の抗張力にほぼ比例して上昇するが、疲労限は素材線の硬化の進むにつれてやゝ飽和して来る傾向にある。従つて現在得られている以上の強力な螺旋ばねを作るには高抗張力ピアノ線の製造を圖るよりも振り加工法を利用する方がより効果的である。すなわち低級な素材線にこの方法を適用することによつて高級ピアノ線ばね以上のものを得ることが可能である。

本研究は東芝マツダ研究所高木通泰博士の御懇篤なる指導によつて行われた。タンガロイ工業松山芳治博士より種々御鞭撻を戴きまたピアノ線の性質に關して東京工大作井誠太博士より種々御教示を戴いた。また材料の分析に關して日本製鋼所室蘭製作所山下健氏の御盡力を戴いた。深く謝意を表します。

(10) Kent's, *Mechanical Engineer's Handbook*, 11th. Ed. (1938), 10-12; C. T. Edgerton, A.S. M. E., 61 (1939), 643; H. C. Burnett, C. L. Stangaitics, Met. Progr., 64 (1953), 177; Harold, C. R. Carlson, Prod. Eng., 25 (1954), 217.