繰返圧縮荷重を受けるコイルばねの変形および強さ*

(第2報 鋼線ばねについて平均応力の影響)

河 本 実** 桜 井 忠 一*** 藤 谷 景 三****

On the Deformation and the Strength of Coiled Spring under Repeated Load

(2nd Report: Effect of Mean Stress on Coiled Spring of Steel Wire)

by

Minoru KAWAMOTO, Tadakazu SAKURAI
(Kyoto University) (Himeji Technical University)
and Keizo FUJITANI
(Ritsumeikan University)

In the previous paper, we reported on our experiments about the coiled springs of steel wire under pulsating compressive load (mean compressive stress τ_m is equal to stress amplitude τ_a). In the present tests, the fatigue strength and the deformation due to fatigue were obtained with regard to the cases when various mean stresses were applied. Further, the creep deformation under static load was obtained and compared with that under repeated load.

The results were as follows:

- (1) A residual shear strain of coiled springs under repeated compressive load was largest in the pulsating test ($\tau_m = \tau_a$) and became lower in proportion to an increase of mean stress, but little variation was observed where $\tau_m / \tau_a = 0.6$.
- (2) Fatigue limit (Maximum stress) got higher with an increase of mean stress.
- (3) A stress amplitude at endurance limits decreased showing a straight line in accordance with addition of mean stress, and that in a deformation limit did not vary on the whole as if it were constant when $\tau_m / \tau_a = 1 \sim 0.6$, but began to decrease rapidly when mean stress was made beyond such a range.

(Received Aug. 6, 1959)

1. 緒 言

金属の疲労に関する研究は従来非常に多く行なわれてきたが、それらのほとんどは疲労に対する強度を求めたものであり、疲労による変形について研究されたものはきわめて少ないようである。しかし、実際材料の疲労に対する安全使用範囲は強度のみならず、変形によっても大きな制限を受けるものである。とくにある種のばねにおける実例をみると、いわゆる、ばねのへたりによる破損の数は、疲労による破損の数に比べ決して少なくない。もとより、ばねのへたりは疲労変形によるものであり、へたりを左右するものは主としてばね材料の疲労弾性限度である。前報においては、コイルばねに片振圧縮荷重を加えた場合について報告したので、ここには、平均応力を与えた場合の応力繰

返数と残留変形との関係、ならびに疲労強度を実験的に求め、さらに静荷重によるクリープ変形をも求め繰返荷重の場合と比較考察した。

2. 試 験 装 置

実験に用いた試験機は、静荷重用と繰返荷重用との2種類である。静荷重用には重錘を用いて試験ばねにつねに一定の荷重がかかる型式のものを使用した。繰返荷重用としては、Fig. 1 に示す試験機を使用した。Fig. 1 に示す装置は、試作したばね専用疲労試験機で電動機によりベルトをつうじ下部の偏心カムEを取りつけた主軸を回転し、偏心カムEを回転さす。ゆえにEは、偏心用ナットにより調整し、Eを偏心させることによりうえのローラRをつうじ往復棒Pを垂直に上方に動かすもので、試験ばねは往復棒PとHのばね押えとの間に取りつけられる。Hが調整ナットによって調整され、ばねのへたりに応じてつねに調整を行なうのは Fig. 1 と同じである。回転数は毎分1000~950回である。両者の試験機において、試験ばねに加える

* 原稿受付 昭和34年8月6日

** 正員 京都大学工学部

*** 正員 姫路工業大学

**** 正員 立命館大学理工学部

荷重はつぎの項で示すようにたわみ, すなわち最大圧縮量から求められ, 最大圧縮量の検定はチャック爪, あるいは偏心用ナットによりカムEの中心と主軸の中心とを偏心させ, その量をダイヤルゲージで測定して振幅を定めた.

3. 試験方法

前項で説明したコイルばね用繰返圧縮試験機を用いて, 片振および部分片振圧縮試験を行なった. 試験片(コイルばね)に所定の繰返応力を与えるには, まず試験片に与えるべき平均応力 τ_m および応力振幅 τ_a を決定し, 次式により応力を荷重に換算する.

$$P = \frac{\pi d^3}{8D} \tau \tag{1}$$

P : ばねの軸方向に作用する圧縮荷重

$D=2R$: コイルの平均直径

$d=2r$: ばねの素線の直径

τ : ばね素線におこる最大ねじり応力

上式によりばねに加えようとする τ_m および τ_a をそれぞれ平均荷重 P_m および荷重振幅 P_a に換算し, 後述の Fig. 3 に示す静荷重-たわみ線図により, P_m および P_a に相当するたわみ δ_m および δ_a を求める. このようにして δ_m および δ_a を決定し, 試験機のナットを調節して δ_m を, カムの偏心量を調節して δ_a を与えるようにした. 試験機は変形一定型のものであるため前項で説明したように, 試験片に残留変形を生じたときには δ_m が減少する結果となるので, δ_m および δ_a をつねに一定に保つよう努めた. ただし, δ と P との関係は残留変形を生じた後も変化はしないものとし, 見かけのせん断応力一定の疲労試験を行なっ

た. 残留変形を生じた後の P と δ との関係が, 残留変形を生ずる前の P と δ との関係に実際上等しいことは実験によって確かめた. 残留変形を測定するにはある時間, またはある繰返数ごとに試験機から取りはずして, 1/100 mm のダイヤルゲージでできるだけすみやかに, その高さを測定して求めた. なお, たわみ δ をせん断ひずみに換算するには次式を用いた.

$$\gamma = \frac{\tau}{G} = \frac{16PR}{\pi D^3} \cdot \frac{\delta \cdot d^4}{64PR^3n} = \frac{d}{2Rl} \delta \tag{2}$$

γ : ばね素線におこるせん断ひずみ

δ : ばねのたわみ

l : ばね素線の有効長さ

G : ばね素線材料のせん断弾性係数

n : コイルばねの有効巻数

4. 試験材料および試験片

実験に供したばね材料は 5・5 mm の丸棒から 9 段階の引抜き工程を経て, 直径 3 mm に仕上げられたもの

Table 1 Chemical composition of wires

Mark	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SII	0.63	0.15	0.73	0.019	0.016	0.21	0.08	0.05

Table 2 Mechanical properties of wires

Mark	Tensile strength (kg/mm ²)	Cycles of twisting for rupture	Modulus of elasticity E (kg/mm ²)	Modulus of rigidity G (kg/mm ²)
SII	128	40	21000	8100

Fig. 1 Fatigue testing machine

Diameter of wire	d (mm)	3.00
Diameter of coil	D (mm)	12.00
Number of effective winding	n	6.00
Free length of spring	h (mm)	35.00
Natural frequency	cps	63.70

Fig. 2 Coiled spring test piece

である。なお、途中洗淨およびパテンティングを施した。この材料の化学成分および機械的性質をそれぞれ Table 1 および Table 2 に示した。試験片は上記の素線を自動ばね巻機によって、Fig. 2 に示すような形状および寸法に仕上げられ、後 300°C で 12 分間低温焼鈍した。図のようにばねの両端部は平坦に研摩仕上し、両端の 3/4 巻は傾き角を変えて、巻終り部で第 2 巻目と接するようにした。有効巻数 n の値としては、これら両端の 3/4 巻の部分のをぞいて、 $n=6$ とした。コイルのピッチは 5mm、図に示す傾き角 α は約 7°30' で、コイルの直径 D と素線の直径 d との比は $D/d=4$ である。各ばね試験片についてすべて正確に同一寸法に仕上げることは困難であるので、その誤差を測定した結果、ばねの高さについて +0.6%~0.5% コイルの直径について +1.2 ないし 0.6% の誤差が認められた。

5. 実験結果およびその考察

(I) 静応力-ひずみ線図

上記コイルばねの圧縮試験を行ない、荷重とたわみの関係を求め、これをせん断応力とせん断ひずみとに換算した応力-ひずみ線図を Fig. 3 に示す。残留せん断ひずみが 0.006% まではほぼ直線とみなすことができるので、このひずみに相当する応力を比例限度とした。また、この線図からばね定数を求めると 8.4 kg/mm² である。これらを Table 3 に示す。

(II) 残留せん断ひずみ-繰返数曲線

各試験片について、一定繰返数ごとに残留たわみを測定し $\tau_a/\tau_m=1, 0.8, 0.6$ および 0.4 なる場合の結果を示すと、Fig. 4 から Fig. 7 のようになる。これ

Fig. 3 Stress-strain diagram of coiled spring

Table 3 Stress and strain at the limit of proportionality

τ (kg/mm ²)	Shear strain γ	Residual shear strain γ_r	Spring constant K (kg/mm ²)
53.1	6.3×10^{-3}	0.599×10^{-4}	8.4

Fig. 4 Creep curve for repeated compression of heat treated spring ($\tau_a=\tau_m$)

Fig. 5 Creep curve for repeated compression of heat treated spring ($\tau_a=0.8\tau_m$)

Fig. 6 Creep curve for repeated compression of heat treated spring ($\tau_a=0.6\tau_m$)

Fig. 7 Creep curve for repeated compression of heat treated spring ($\tau_a=0.4\tau_m$)

らの残留たわみ-繰返数曲線の形は、前報（片振の場合）と同様に初期において、残留たわみ量が急激に増加し繰返数が増すに従って漸次ゆるやかになる。繰返応力の小さいときは、残留たわみは $N=10^6$ 以内にはほぼ一定となり、ある限度以上の繰返応力においては、試験片のたわみは一定にならずある繰返数の後素線の内側にき裂を発生してたわみが急激に増大しついに破断する。また、き裂と破壊までの繰返数は、平均応力が加わるに従い少なくなり、破壊を予期しがたいほど急に破壊する。○印はき裂の発生する点、×印は破断の位置を示す。

(III) S-N 曲線

片振または部分片振り試験の結果を S-N 曲線で示したのが Fig. 8 である。図中縦軸は、最大応力 $\tau_{\max} = \tau_m + \tau_a$ を横軸は繰返数 N をとってある。ただしこの繰返数とは、試験片にき裂の発生したときまでの繰返数である。いずれの曲線も $N=10^6 \sim 10^7$ の範囲に限界繰返数が存在するから、コイルばねの耐久限度を決定するには、 $N=10^7$ まで応力を繰り返せばよいことがわかる。 $N=10^7$ における水平線の高さを耐久限度と決定した。耐久限度を最大応力で表わしたときは、平均応力が加わるに従って高くなる。耐久限度における残留せん断ひずみは Table 4 に示すように $\tau_a/\tau_m = 1, 0.8, 0.6$ および 0.4 に対しそれぞれ $0.65 \times 10^{-4}, 0.44 \times 10^{-4}, 0.50 \times 10^{-4}$ および 0.44×10^{-4} である。

(IV) 残留せん断ひずみ-時間曲線

一定の圧縮荷重を試験片に加えた場合の残留たわみ

Fig. 8 S-N curve of helical spring

Table 4 Stress and strain at the fatigue limit

τ_a/τ_m	Fatigue limit $\tau_{\max} = \tau_a + \tau_m$ (kg/mm ²)	Residual strain at fatigue limit
1.0	38.2	0.65×10^{-4}
0.8	41.2	0.44
0.6	44.4	0.50
0.4	50.0	0.44

と時間との関係を示すと Fig. 9 のようになる。ただしこの場合、疲労試験における残留たわみと比較の便利のため、一定時間ごとに荷重を除去して測定した残留たわみで表わしている。

静圧縮荷重を加えた試験においては、繰返荷重試験のさいには破壊をおこしたと同じ大きさの最大応力を与えても破壊を生じなかった。また、応力の値が片振り耐久限度より小さいときは、最初急激に変形を増すが短時間後において一定となる。

(V) 応力-ひずみ線図

繰返荷重を与えたときの最大せん断応力と残留せん断ひずみとの関係を Fig. 10 に示す。また、図中点線で示したのがそれぞれの耐久限度に相当する最大せん断応力である。ただしこの残留せん断ひずみとは繰返圧縮試験にさいし試験片が破断したときは、き裂発生時の値、破断しない場合は繰返数 $N=10^7$ における値である。静圧縮試験の場合の残留せん断ひずみは、繰返圧縮試験における応力繰返数 $N=10^7$ に相当する時間、すなわち約 150 時間に対する値をとってある。

Fig. 11 は Fig. 10 の結果をまとめて示したもので、これより明らかなように、残留ひずみの大きさは τ_a/τ_m の比が 1 より 0.6 までは減小するに従いしだいに小さくなっている。

(VI) 応力振幅 τ_a -平均応力 τ_m 線図

S-N 曲線から求めた耐久限度の値を縦軸に τ_a 、横軸に τ_m をとって描いたものが Fig. 12 の黒丸および実線で示した線である。また、Fig. 11 から残留ひず

Fig. 9 Creep curve for static compression ($\tau_a=0$)

Fig. 10 τ - γ_r diagram for steel spring (S)

$\gamma_r = 0.6 \times 10^{-4}$ の一定値になるときの τ_a および τ_m を求めて図中に示したのが白丸および点線の曲線である。疲労破壊に対する限度は、片振から平均応力が増加するに従って、許容応力振幅も直線的に順次小さくなるに対し、疲労変形の限度は $\tau_a/\tau_m = 1 \sim 0.6$ の範囲では τ_a の値は τ_m の大きさにかかわらずほとんど変化せず、ほぼ一定とみることができる。そのときの変形限度線の横軸に対する傾きを求めると約 $55^\circ \sim 60^\circ$ ぐらいである。よって、変形限度線

Fig. 11 τ - γ_r diagram for steel spring

Fig. 12 Endurance limit and deformation limit diagram

図は1本の水平線 ($\tau_a/\tau_m = 1$ より 0.6 まで) と、1本の傾斜線 ($\tau_a/\tau_m < 0.6$) により与えられるように思われる。疲労変形限度線図(点線)は残留ひずみ γ_r がある一定限界値、すなわち $\gamma_r = 0.6 \times 10^{-4}$ に相当する応力をとって描いた曲線であるが、この曲線は $\tau_a/\tau_m = 1$ の片振応力では疲労限度線図の値とほぼ一致するが、平均応力が増加すると一部分疲労限度線のほうが低く現われるので、ばねの設計には変形限度線と疲労限度線でかこまれた部分が安全な使用範囲を示す。なおへたりをもっと小さく規定し、たとえば $\gamma_r = 0.4 \times 10^{-4}$ にした場合も変形限度線図は鎖線のように点線と相似の曲線となった。この場合は疲労破壊限度線よりも安全側にくるので、ただ変形限度線のみで使用範囲が定まる。これらの結果からも明らかに、 $D/d = 4$ ぐらいの小型ばねにおいては、ばねの使用は $\tau_a/\tau_m = 0.6$ ぐらいの平均応力を与えるように、取りつけて使用するとともに有利なようである。

6. 結 言

以上の結果をまとめるとつぎのようになる。

(1) 平均応力を与えた繰返圧縮荷重を受けるばねにおいては、残留せん断ひずみ-繰返数曲線は最初急激に増加し、以後その増加の割合は漸次小さくなる。そうして、繰返応力が耐久限度以上のときは、その変形は試験片が破壊するまで続き、耐久限度以下の繰返応力の場合はある繰返数の後に変形はまったく停止し一定となる。

(2) 耐久限度は平均応力が加わるに従ってしだいに応力振幅は低下する。また、変形限度も $\tau_a/\tau_m = 1 \sim 0.6$ の範囲では片振の場合とあまり変わらないが、これをこえると急に低下する。残留せん断ひずみは片振試験の場合が一番大きく、平均応力が加わるにつれてしだいに減少し、 τ_a/τ_m の値が 0.6 より小さくなれば、あまり変化が現われていないがふたたび増加するようである。

(3) すなわち、耐久限度線は1本の斜線により、また、変形限度線図は一本の水平線 ($\tau_a/\tau_m = 1 \sim 0.6$) と1本の傾斜線 ($\tau_a/\tau_m < 0.6$) により与えられる。

参考文献

- 河本実, 桜井忠一, 藤谷景三, 材料試験, 3, 17, 443~449 (昭和29)
- DeMoney and Lazan, ASTM Proc. Vol. 54 (1954)