うず巻きばねのへたりについて*

近 藤 誠 治**

Load Drop due to Fatigue of a Spiral Spring

by

Seiji KONDO

(Faculty of Engineering, Niigata University)

The literature about the fatigue of a spiral spring can scarcely be found as compared with that of the coiled helical spring, and the report of Mr. Kawada and Mr. Watanabe is the only one in our country. In compliance with a request of a maker of spring balancer in this district, the fatigue test of spiral spring was carried out, and some data were obtained.

For this purpose, a testing machine with a shifting rod was used in our test, and the number of repetition in loading up to the fracture as well as the drop due to fatigue seen until the fracture takes place were carefully observed.

From the result of the test, it has been found that in case of a repetition number of 5000 times, the spring dropped 2~5% in torque owing to the fatigue, and that a further drop could not be seen after that. It was attempted to make an experimental formula for the relation between the load drop and the number of repetition. The formula can only be applied to a range up to 5000 time repetition.

(Received May 20, 1961)

1. 緒 言

うず巻きばねはコイルばねに比べて疲労試験のデータが乏しく、わが国では川田、渡辺両氏の報文を見るにすぎない。筆者は当地方のスプリング・バランサ製作会社の求めに応じ、うず巻きばねの疲労試験を実施し、一部の結果を得たので報告する。

この実験のために振り棒式早もどり往復運動をする疲労試験機を作製し、繰返荷重を作用させ、破断までの繰返数とばねのトルクの低下していく状態すなわちばねのへたりを観察した。今回の実験範囲の荷働では、初めの5000回くらいで2~5%へたり、それ以後はほとんどへたらずに破断に至るようである。繰返数とへたりの間の関係について、5000回くらいまであてはまる実験式を作ってみた。

2. 試 料

この実験に使用したばね材はSK-5炭素工具鋼で、その成分は分析の結果もほぼ規定の範囲内であった。焼なましは740~760°Cで徐冷し、焼入れは780~820°Cで水冷する。もどしは400°Cである。

熱間圧延した平板を焼なまし、一定の幅に切断して帯板とし、面取り加工を施したのち熱処理する。鋼材は同一ロットから切断したので、材質は一応均一性を

もつものとする。この実験に使用したばね板の寸法は、全長4200mm、板幅22mm、厚さ約1mmで平常締付け状態におけるうず巻きばねの巻き数は13~15である。

材料屋から送られたばね材は所定の長さに切断し、旋盤で巻き取ってうず巻形に成形する。帯板の両端部数cmをガスバーナで加熱して焼きをもどし、両端を折り曲げる。ばねの中心となる一端は長さ約1cmをほとんど直角に折り曲げ、他端はかぎ形に折り曲げる。折り曲げは所定の型に従い、ハンマで行なう。

内側折り曲げ部分を直径20mmのみぞ付き巻き取棒のスリットに挿入し、旋盤で巻き取る。巻き取りの終りにおいて他端のかぎ部は巻き取りケースの突出部に引き掛け、更に旋盤を回して巻き締め塑性変形を与え、ばねの外径が約20cmになるに及び針金で押えて作業を終る。

3. 試 験 機

Fig. 1は使用した試験機の説明図である。①は1/2馬力交流モータで、その規定回転数は1500rpmである。回転はけさ掛けベルトにより滑車②③を経てウォーム④、ウォーム車⑤に伝わる。ウォーム車軸に歯車⑥を取り付け、これより歯車⑦に動力を伝達する。これら3段の減速により回転数は7.5rpmになる。したがって毎時回転数は450回である。歯車⑦の回転はクランク⑧、ゆり棒リンク⑨により首振り運動に変えら

* 原稿受付 昭和36年5月20日、当協会第10期総会(創立10周年記念)講演会にて講演(昭36.5)

** 正員 新潟大学工学部

れゆり棒の一端にワイヤ⑩を取り付けてドラム⑪を回す。ドラムにワイヤを巻き付け、巻きもどして試験片に繰返荷重を与える。試験片は垂直天井に固定されたばねケースの中に挿入されている。ドラムとケース間の距離は約3.5mである。

ばねの巻締めおよび巻きもどし時間はそれぞれ5.38sおよび2.62sで、1往復に要する時間は8sである。

ばねを挿入するケースは Fig. 2 に示す構造をもち、

アルミニウム・ケースの中にはばねを巻きふぐすための直径145mmのドラムと、これに連結した中心軸に外径約102mmのうず巻きばねとが入れてある。ばねの外端はケースの内側に固定する。ドラムにワイヤを巻き、その一端はケースの窓より引き出され、ワイヤのストロークとばねのトルクが正比例するように設計してある。ばね軸はラチェット装置でばねの初荷重が調節できるようにしてある。

Fig. 1 Schematic diagram of the testing machine

① Motor	⑤ Worm wheel	⑧ Crank	⑪, ⑫ Drum
②, ③ Pulley	⑥ Gear I	⑨ Shifting rod	⑭ Spring case
④ Worm	⑦ Gear II	⑩, ⑬ Wire	

Fig. 2 Holding case of the test spring

① Wire drum	④ Holding case	⑦ Ratchet
② Spring case	⑤ Cover	⑧, ⑨ Ball bearing
③ Bearing drum	⑥ Shaft	⑩ Wire

いまワイヤの引張力を P とし、ドラムの有効直径を D とすると、ばねに働くトルク M は次式となる。

$$M = DP/2 \quad (1)$$

この場合 $D=140\text{mm}$ である。

ストローク途中のトルクすなわち引張力の変化を測定するには、引張りワイヤの途中に厚さ 1mm 、幅 10mm の薄鋼板を取り付ける金具を挿入し、ストレイン・ゲージで行なった。ゲージはうす板の表裏に2枚はり付け、荷重と伸びの検定曲線よりトルクを測定する。

4. 実験方法

実験に使用したばねはスプリング・バランスとして使用する場合、安全使用荷重 $4.5\sim 9\text{kg}$ 、ストローク 1360mm のものである。今回の実験では、実験時間の短縮を図るためストロークは最大値をとり、 1400mm としてこれを一定とし、ばねのトルクを変えた。トルクは引張力で最小 7.7kg より最大 12.6kg の間で実験し、その中間の 9kg 付近のものを多くした。荷重 9kg はこのばねのバランスとしての荷働最高容量である。

ケース中に充てんされたばねの中心軸を適当に回転し、引張力を定めた値にしてラチェットする。ここで実験前の各ストロークのばねの引張力をひずみゲージまたはばねはかりで測定し運転を開始する。運転回数は計数器で読む。運転は昼夜連続で行なうが、多くの場合夜間は休止した。

5. ばねに生ずる応力²⁾

ばねに生ずる曲げ応力は次式で求めた。

$$\sigma = \frac{Et}{2(1-\mu^2)} \left(\frac{1}{\rho} - \frac{1}{\rho_0} \right) \quad (2)$$

ここに $1/\rho_0$ および $1/\rho$ はそれぞればねの自由状態および変形後の同じ点の曲率である。 E 、 μ はばね材の弾性定数で、この場合 $E=2.1 \times 10^4 \text{kg/mm}^2$ 、 $\mu=0.3$ にとる。ばねの板厚 t は 1.0mm である。

いまケースに納めた状態におけるばねの曲率を $1/\rho_1$ 、ばねを完全に巻き締めて密着させた状態のそれを $1/\rho_2$ として、曲率の測定値の1例を Fig. 3 に示す。これらの値より(2)式により応力を求めたのが Fig. 4 である。巻き締めた状態では相当大きな応力が働くことになり、ことにばねの中心から長さで 100cm 付近に 350kg/mm^2 程度の応力が働いている。しかしこのばねは接触型であるので、ばね板間の摩擦力も作用するので、実際にはこれよりいくぶん少ないものと考えられる。

うす巻きばねの曲げ応力をトルクから求めるには次式による。

$$\sigma = \frac{M}{Z} = 3 \frac{PD}{bt^2} \quad (3)$$

ここに b 、 t はそれぞればね板の幅および厚さである。いまこのばねの荷働範囲として、トルク M に対して $(3\sim 11) \times 7.0 \text{kg}\cdot\text{cm}$ の値を採用し、ばねの中心における応力を(3)式より求めてみると、最小荷重 $P=3\text{kg}$ に対し 57.3kg/mm^2 、最大荷重 11kg では 210kg/mm^2 と得られる。これら二つの最大応力はばねの中心に生ずるものであるが、曲率より求めた最大応力は中心よりむしろいくぶん外側に生じ、その値もはるかに大きい。いずれにしても普通の荷働状態では $60\sim 200 \text{kg/mm}^2$ 程度の曲げ応力が働いているものと思われる。

ばねに働く応力の実際の値を求めるため、ストレイン・ゲージを使用して測定した。成形を終わったばね板の一部分において、板の表面に Fig. 5 のようにゲー

Fig. 3 Curvature of a spring

Fig. 4 Stress of a spring at any point

Fig. 5 Strain gauge

ジをはり、両端支持の集中荷重をかけて一定の曲率まで曲げ、そのひずみを測定して応力に換算した。Fig. 6 は特定の点の測定例で、図中●印および○印はそれぞればねの中心より 300 および 400 mm の点における曲率と測定応力の関係で、2 本の直線は(2)式による計算値である。この試験片の自由状態における曲率は 300 および 400 mm に対し、それぞれ 0.079 および 0.068 cm^{-1} であった。計算値と測定値はかなり一致している。

6. ばねの疲労

今回の実験において、破断まで完全実験をなした試験片の破断回数は Table 1 に示すとおりである。実験値のばらつきがはなはだしく、今回の実験結果よりはトルクと破断回数との間に普通の疲労試験に得られる関係は見い出せなかった。ただ表から見られるように、トルク 60~67 kg·cm の範囲における破断回数は 20 000~35 000 回で、平均 27 500 回である。

疲労に影響する項目は種々あるが、トルクによる応力の大小とばねの全域にわたる応力分布が重要であることが考えられる。また実験値のばらつきのおもなる原因として、ばね中心部の形状が考えられる。この部

Fig. 6 Stresses at the distance of 300 mm and 400 mm from the center of a spring

Table 1 Number of repetition up to fracture ($s=1400 \text{ mm}$)

Test piece No.	Initial max. load	Initial max. torque	Max. stress	Repet. No.
	P (kg)	M (kg·cm)	σ (kg/mm ²)	
3	7.4	51.8	141	30 503
4	7.7	54.0	147	27 029
7	8.8	61.6	168	22 576
8	8.9	62.3	170	22 386
9	9.0	63.0	172	35 142
10	9.1	63.7	174	23 079
11	9.5	66.5	181	25 140
12	10.7	74.9	204	(34 534)
13	12.4	86.8	237	20 503

分は焼もどしを行なってばねを成形するにあたり、直角に折り曲げて巻き取るのであるが、この曲げ加工が不規則に成形されるため、この部分に近い初めの 2, 3 巻きの成形が乱される。このためストロークの終りにおいてこの部分のばね板が異状に接触して摩擦摩耗を起こし、曲げ応力のみでなく接触摩耗のために破断するものと考えられる。一般にこの種の密着型うず巻きばねは、トルクによる曲げ応力が大きくなるばかりでなく、中心部の形状不完全に帰因する接触圧力のため、密着時において矯正変形を起こし、この変形は更に他の部分の応力分布に影響を与える。Photo. 1 は破断状態を示す写真の数例で、試験片のすべてが同様の破断形状を呈した。破断箇所は巻き始めから 2, 3 巻きのところで、ばね中心から長さで 100 cm 以内に起こっている。

二、三の試験片の破断部分および破断外の数個所に

Photo. 1 Fatigue failure of the test pieces

Fig. 7 Initial torque at every stroke of the spring used in our test

ついて、顕微鏡組織を調べてみたが、どの部分も一様な粒状パーライトで、破断箇所は加工時のもどし作業の熱影響も受けておらず、破断の原因が形状の不規則に基づくものであることがこの点からもうかがわれる。中心部のばねの成形およびばねの中心回転軸に取り付ける際のスリットの形状は一層工夫を要することである。

7. ばねのへたり

Fig. 7 は今回実験した全試験片の初期トルクとストロークの関係である。縦軸のトルクはの場合荷重をとり、kg 単位の数値で与えてある。引張力は運転開始にあたり各ストロークごとに測定したものである。大体直線関係を示し、直線の傾斜もほぼ平行とみられる。多少の乱れは種々の原因が考えられるが、ばねの異状取付け成形の不規則が最も大きいものと考えられる。

運転を開始したのち適当時間経過したとき、運転を一時停止して Fig. 7 を得たと同様な測定を行ない、トルクの減少状態すなわちばねのへたりを観測する。この測定は破断まで数回にわたり、適当な繰返数において行なう。Fig. 8 は初張力 10.7 kg、すなわち初期トルク 75 kg·cm なる試験片の各ストロークにおける

Fig. 8 Load drop at every stroke of the piece No. 12 (Initial max. torque 75 kg·cm)

Table 2 An example of load drop of spring (Max. initial torque 86.8 kg·cm, test piece No. 13)

Stroke (mm)	Initial torque (kg·cm)	Torque after fatigue (kg·cm)	Load drop	
			(kg·cm)	(%)
200	9.6×7	9.0×7	0.6×7	6.25
400	10.2×7	9.5×7	0.7×7	6.87
600	10.7×7	10.0×7	0.7×7	6.55
800	11.2×7	10.7×7	0.5×7	4.46
1000	11.6×7	11.0×7	0.6×7	5.17
1200	12.0×7	11.4×7	0.6×7	5.00
1400	12.4×7	11.8×7	0.6×7	4.84

へたりを測定したものである。図からみられるように 3000 回くらいまで急速にへたり、それ以後へたりは減少し、6000 回以後はほとんどへたりは認められず、破断まで大体一定のトルクを保持する。この傾向はその他の試験片についても同様の傾向をもつ。Table 2 は各ストロークにおける初期トルクと充分へたった後のトルクのありさまを示すために掲げたものである。全ストローク 1400 mm に対して、ストロークの少ないほどへたりは大きい。

Fig. 9 は今回の実験の全試験片のへたり状態を示す。この図から初期トルクの大きいものほどへたりは大きく、繰返数 5000 回くらいでへたりは停止する。このばねの使用範囲である 9 kg 付近の初期荷重のものでは 0.4 kg すなわち 4.5% 近くのへたりを生ずる。

試みに実験データよりへたりに対して実験式を作製した。トルクのへたり度 $\Delta M/M$ が初期トルクに直線的であるとして次の形の式を仮定した。

$$\Delta M/M = a(M/M_1) + b \quad (4)$$

直線の定数 a, b をストローク s と繰返数 n の関数として次の式を決定した。

$$a = 1.95 \times 10^{-2} - 1.45 \times 10^{-2}(s/s_1) + 2.1 \times 10^{-5}n - 1.90 \times 10^{-9}n^2 \quad (5)$$

$$b = 2.97 \times 10^{-3} - 4.25 \times 10^{-3}(s/s_1) - 3.02 \times 10^{-6}n \quad (6)$$

式中の ΔM は初期トルクに対するへたり値、 M は初期トルク、 M_1 はこの実験の最大トルクである 86.8 kg·cm をとる。また s は任意の点のストロークで、 s_1 は最大ストローク 1400 mm を代入する。 n は繰返数である。これらの式の適用範囲は初期トルク 50~86.8 kg·cm、繰返数 1000~5000、ストロークは 200~1400 mm である。

実験式は他の形でも表わしうが、3000~5000 回付近によくあてはまる形式として上記を採用した。 n の更に大きいところまであてはまる係数も定めうが、へたりの最も大きい 5000 回以内がわるくなるので、小範囲のものでがまんした。Fig. 8, 9 の実線で示し

Fig. 9 Load drop of the test pieces at max. stroke of 1400 mm

た曲線は(4)式による計算値で、5000回以後は単に直線で延長したものである。

いま初期トルクに対して2.5%だけへたる繰返数を(4)式より求めて図示すれば、Fig. 10を得る。この場合ストロークは1400 mmで、実験値は実験の傾向線から決定したものである。二、三のばらつきはあるが、実験点は計算曲線の付近に点在する。

Fig. 10 Repetition number showing 2.5%. Load drop at max. stroke $s=1400$ mm

8. む す び

特定な寸法の密巻き型うず巻きばねの疲労実験を実施して、破断回数とトルクの関係、へたりに度を調べた。この種のうず巻きばねの破断までの寿命は、ばねのうず巻き形の成形および中心軸へのばねの取付け方法が太いに関係する。

へたりに初めの5000回付近まで急速であるが、それ以後破断まで大体一定である。へたりにに対して特定の荷働範囲にあてはまる実験式を作製した。

この実験は昭和34年度機械工学科卒業生小林光一君によって試験機が設計製作され、昭和35年度同川瀬善次郎、藤田満両君によりデータがとられた。遠藤工業会社は試料を提供され、同社遠藤工場長、近藤技術部長は実験遂行に多大の便宜を与えられた。記して謝意を表わす。

参 考 文 献

- 1) 川田雄一、渡辺敏、材料試験, 5, 31, 225 (1956)
- 2) ばね, p. 198 (1959) 丸善書店

(581頁より)

80Ni-20Cr 合金のクリープ破断性質 (The Creep-Rupture Properties of 80Ni-20Cr Alloys) Robert Widmer and Nicholas J. grant, J. Basic Engg., Trans. ASME, Vol. 82, Ser. D, No. 4, pp. 829/838 (1960) 図10, 表4

80Ni-20Cr 系耐熱合金について、溶解法および微量元素の相違によるクリープ破断性質の変化を調べたものである。試験は温度(1200°~1800°)Fの下で、(0.01~1000)hのクリープ破断時間の範囲で行なわれている。材料は、一、二の例外はあるが、C, P, S, Fe, Mnなどの含有量を充分低くしてあり、Siについては低いもの(0.1~0.3%)と高いもの(1.2~1.4%)に分かれている。5組の材料のうち、2組が真空溶解、3組が空中溶解によって造られている。各組の材料とも、溶態化処理(2050°F, 1h, 水焼入れ)の後焼ならし(1500°F, 24h, 空冷)が行なわれている。観察は主として、応力-破断時間の関係、クリープ曲線の形状、破断伸びおよび絞りについて行なわれている。応力-破

断時間の曲線は、大きな伸びと粒内破断を示す高応力域、それに続く、伸びが減少し粒界破断を示す中間応力域および、通常の弱化現象とは反対に強化現象が現われ曲線の傾斜がゆるやかになる低応力域が現われるが、これらの曲線に対する溶解法および微量元素の影響は小さい。クリープ曲線の形は高応力域から低応力域に移るにつれて、第1期クリープ量が減少し、第3期クリープ量が増加するが、第2期クリープ量の変化は少ない。破断伸びおよび絞りに対しては、溶解法および微量元素の影響は顕著で、真空溶解の場合の伸びは空中溶解の場合の伸びの(2~3)倍に達している。また M_s/S の値および Si 量によっても伸びは変化し、これらの値が低いほど、伸びが少なくなっている。伸びに対する溶解法および微量元素の影響は、第1期ならびに第2期クリープ量に対しては比較的少なく、主として破壊に関係のある第3期クリープ量に対し顕著である。

(大路清嗣)

(616頁へつづく)