塑性変形を受けた薄板ばねのばね限界値*

清水 湧一** 牟田 敏保*** 落合 昭夫***

Spring Limit of Thin Shaped Flat Spring Subjected to Plastic Deformation

by

Yuichi SHIMIZU, Toshiyasu MUTA and Akio OCHIAI

(The Electrical Communication Laboratory Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation, Musasino)

Bending yield stresses (Spring limit) of copper alloy and stainless steel flat springs decrease considerably when they are subjected to plastic deformation by stretching or bending them in the opposite direction. Hereunder is presented a report of the investigation performed of the degree of decrease in spring limit and the material factors in the specimens in heat treatment and the effect of the rolling direction on the axis.

The results are as follows:

(1) The spring limit of a thin shaped flat spring decreases when the stress applied on the spring has a opposite direction to pre-stress, and increases when it has the same direction.

(2) The spring limit of the specimen subjected to pre-stretching stress decreases with increase of pre-plastic strain over the elastic limit, and is constant when the pre-stretched plastic strain becomes higher than 0.2%. This constant minimum spring limit K_{bmin} is about 10 to 25 kg/mm², and this value is about 1/10 to 1/2 of the spring limit before deformation.

(3) The spring limit of the specimen subjected to pre-bending stress increases by the bending, and decreases by bending it in the opposite direction. The spring limit that decreased by bending it in the opposite direction can be improved as the deformation increased on the opposite side.

(4) The spring limit of the specimens containing different materials, heat treatments, degree of cold reduction and specimen axis decrease similarly when pre-plastic strain applied, and these factors will affect K_{bmin} a little.

(5) The decrease of spring limit by stretching or bending plastic deformation is due to Bauschinger effect.

(Received Sep, 27, 1969)

1 ま え が き

小形継電器、スイッチのばねには洋白、ベリリウム銅、18-8系ステンレス鋼、17-7PH ステンレス鋼などの断面高さの小さい線あるいは薄板材が用いられている。これらの材料は冷間加工後低温焼なましあるいは時効処理を施してばね性を改善しているものが多い。しかし、実用のさい、ばねはさらに塑性曲げ、つぶし、ねじりなどの加工工程をへて成形されるから、ばね性

に対するそれらの影響を知る必要がある。継電器、スイッチのばねは片持り形式で用いられ、動作時に生ずるばね先端付近の縦方向変位をできるだけ小さくするために、Fig. 1 のように曲げ加工を施している。このような曲げばねにおいては、曲げ降伏応力の（ここではばね限界値^{*1}を用いる）低下することが認められているが、その程度ならびに原因は従来明確でなかった。

板厚 0.1~1 mm の薄板ばね材に塑性変形を与えたときのばね限界値の変化を検討する目的をもって、あらかじめ与える塑性変形として(1)引張塑性変形(2)曲げ塑性変形（順曲げと逆曲げ^{*2}）の2種類を考え、それぞ

Fig. 1. Bent spring.

*1 はね限界値とは、引張試験における耐力に相当する曲げ降伏応力を表わす量である。以下では、ばね長 $l = \sqrt{4000h}$ (h : 板厚) に定めた片持りに曲げモーメントを加え、自由端における残留変位が 0.1 mm に達した時の、固定端での応力をはね限界値 K_b (kg/mm²) と称する。

*2 曲げ塑性変形を与える荷重の向きとはね限界値測定荷重の向きが同じ場合を順曲げ、反対方向の場合 (Fig. 2 において負荷後、試片を裏返してはね限界値を測定する) を逆曲げと呼ぶ。

* 原稿受理 昭和44年9月27日

** 正会員 日本電信電話公社電気通信研究所 武蔵野市緑町

*** 日本電信電話公社電気通信研究所 武蔵野市緑町

Table I. Chemical composition of the materials (%).

Material	Cu	Ni	Zn	Cr	Fe	P	Be	C	Mn	Si	Sn	Co	Al
Nickel silver (NSS)	55.5	18.2	Bal.	—	0.11	—	—	—	0.35	—	—	—	—
Cu-20% Ni	Bal.	20.0	—	—	0.06	—	—	—	0.46	0.03	—	—	—
Phosphor bronze (PBS)	Bal.	—	—	—	—	0.212	—	—	—	—	8.04	—	—
18-8 stainless steel	—	8.90	—	18.14	Bal.	0.029	—	0.06	1.71	0.82	—	—	—
17-7 PH stainless steel	—	7.70	—	17.27	Bal.	—	—	0.049	0.53	0.30	—	—	0.87
Cu-20% Ni-0.5% Si	Bal.	19.96	—	—	<0.01	—	—	—	<0.01	0.54	—	—	—
Cu-2% Be	Bal.	—	—	—	0.03	—	1.83	—	—	—	—	0.29	—

れのばね限界値への影響を調べたので以下に報告する。

2 供試材料と実験方法

2・1 供試材料

試験材料は厚さ 0.1~0.8 mm の冷間圧延薄板であり、その化学成分を Table I に、各材料の履歴、寸法を Table II に示す。本報告では、材料記号として仕上後レベラを通して平坦にした薄板を A. R., A. R. 材を低温焼なまししたものを L. A. なる記号で表わし、また、A. R. 材に張力を加えながら低温焼なましを行なった熱矯正材を T. A., 析出硬化合金の時効処理材を H. T. で示す。供試材料のうち、NSS (洋白),

Cu-20% Ni (キュウプロ・ニッケル), PBS (リン青铜), 18-8 系ステンレス鋼は低温焼なまし形合金と呼ばれている材料であり、一方、17-7 PH ステンレス鋼, Cu-20% Ni-0.5% Si, Cu-2% Be (ベリリウム銅25合金) は析出硬化形合金である。

2・2 実験方法

2・2・1 素材に引張塑性変形を与えた場合のばね限界値の測定 素材および素材に定ひずみ速度引張試験機によって引張塑性変形を与えた試料のばね限界値 (以下 K_b 値と略記する) は高力板ばね試験機 (Fig. 2) によって測定する。

試験機は、この他片持はり先端荷重を直読する形式の試作したたわみ試験機、新形シーメンス測定器および JIS の繰返ししたわみ試験機を用いたが、これらの間に実用上の差異は認められない。

引張塑性変形を与える試験片は有効部の幅: 10 mm 長さ: 70 mm とし、塑性変形を与えた後の K_b 値はこれを適当な長さに切断してから測定した。また、引張応力 σ_t は、加えた荷重を変形後の断面で除した値であり、永久ひずみは標点間 (50 mm) のびより求めた。

2・2・2 曲げの塑性変形による K_b 値変化の検討方法 前述の高力板ばね試験機によって、曲げの塑性変形を加えたのち、 K_b 値を測定している。また、繰返し負荷を加えたときの最大繰応力と荷重点の残留変位の関係をプロットし、順曲げと逆曲げの場合の変形の進み方をしらべる。

3 実験結果

3・1 引張塑性変形を与えた場合の K_b 値の変化

引張塑性変形による K_b 値の変化を Fig. 3~9 に示す。これらの図で、最大応力値を示す点は、その試片

Fig. 2. Spring limit testing machine.

*3 Fig. 2 に示すように、試料①は片持はりであり、支点の固定金具②が、自由に回転できるようになっており、その回転軸に振り子③をつけ振り子の振り上げ角 θ から実際に試料にかかったモーメントを測定し、固定端に作用する繰応力 σ_M を求める。また、ばね長は負荷中はほぼ一定となる。

残留変位は負荷を約 5 秒間保持して、除荷した直後、ダイヤル・ゲージで測定する。

*4 JISH 3801 (1966), JISH 3702 (1963), JISH 3732 (1963).

Table III. Proof stress and minimum spring limit of specimens.

Material	Heat treatment	0.2% proof stress (kg/mm ²)	K_{bmin} (kg/mm ²)
NSS	A.R., L.A.	65	17~27
	T.A.	75	
Cu-20% Ni	A.R., L.A.	60	15~17
PBS	A.R.	65	8
	L.A.	55	
18-8 stainless steel	A.R., T.A.	130	10~25
17-7PH stainless steel	A.R.	120	18~35
	H.T.	150	
Cu-20% Ni-0.5% Si	A.R., H.T.	73	16~23
Cu-2% Be	A.R.	60~70	15~26
	0.2% H.T.	120	
	0.6% H.T.	137	

の引張強度を表わしている。また、図中の記号のうち // は圧延方向に平行に採取した試片を、⊥ は直角に採取した試片を表示している。なお、使用したばね材の 0.2% 永久ひずみに対する引張耐力 $\sigma_{0.2}$ を Table III に示す。

洋白 (Fig. 3) は、45~70 kg/mm² の引張応力 σ_t

Fig. 3. Effect of pre-tensile stress on the spring limit of NSS.

を加えると、 K_b 値が低下し始める。 σ_t を増して、 $\sigma_t \approx \sigma_{0.2}$ とすると、 K_b 値は 30 kg/mm² 以下、さらに引張強度に近い σ_t を加えた場合の K_b 値は約 20 kg/mm² まで低下し、ばね性は著しくそこなわれる。熱処理の種類と有無、圧延率、板取方向が相異しても、引張強度に近い σ_t を加えることにより、若干の差はあるがいずれも $K_b \approx 20$ kg/mm² にまで低下する。

Cu-20% Ni 合金の場合 (Fig. 4) も、洋白と同様な傾向を示す。Fig. 4 によれば、 $\sigma_t \geq 40$ kg/mm² にお

Fig. 4. Effect of pre-tensile stress and pre-maximum opposite bending stress on the spring limit of Cu-20% Ni.

Fig. 5. Effect of pre-tensile stress on the spring limit of PBS.

いて K_b 値の低下が起こっている。

また、PBS (Fig. 5) も同様であり、引張強度に近い σ_t を加えた場合の K_b 値は約 8 kg/mm^2 まで低下している。

他方、18-8 系ステンレス鋼 (Fig. 6) は、 $\sigma_t \geq 60 \text{ kg/mm}^2$ で K_b 値が低下する。また、板厚が異なっても同様な傾向を示す。

以上は、低温焼なまし形合金の実験例であるが、析出硬化形合金においても同様な傾向をもつようである。Fig. 7~9 によれば析出硬化形合金において、 K_b 値

Fig. 6. Effect of pre-tensile stress on the spring limit of 18-8 stainless steel.

Fig. 7. Effect of pre-tensile stress on the spring limit of 17-7PH stainless steel.

Fig. 8. Effect of pre-tensile stress on the spring limit of Cu-20% Ni-0.5% Si.

Fig. 9. Effect of pre-tensile stress on the spring limit of Cu-2% Be.

が低下し始める点の引張応力 σ_t の値は、圧延材と時効処理材とで変わらない。

これらのデータをあらかじめ与えた塑性変形量を永久ひずみの形で整理したのが Fig. 10 である。0.2% 以上の永久ひずみに対し、 K_b 値はほぼ一定とみなせる。

以上をまとめると、 K_b 値は引張応力 $40 \sim 70 \text{ kg/mm}^2$ から低下し始め、 σ_t が $\sigma_{0.2}$ に等しくなると、 K_b 値はすでに $10 \sim 30 \text{ kg/mm}^2$ まで低下してしまう。

Fig. 10. Relation between pre-permanent set and spring limit.

そして、永久ひずみが0.2%を越えてからの K_b 値は σ_t が引張強度に等しくなるまでほぼ一定となる (Fig. 10). 低下して一定となった K_b 値 (K_{bmin}) を Table III に示す. この K_{bmin} の値は、熱処理の有無、圧延率によって若干の差があり、圧延材および圧延率の大きなものは、熱処理材および圧延率の小さなものに比し、 K_{bmin} が約 5 kg/mm^2 程度大きく、とくにばね限界値以上の大きな曲げ応力によって生ずる残留変位は後者に比しかなり小さい (硬化率が大きい).

3・2 曲げ塑性変形による K_b 値の変化

高力板ばね試験機で繰返し曲げモーメントを加えたときのばねの固定端に生じる縁応力 σ_M と自由端の残留変位 Δy の関係を Fig. 11 に示す. 0 点より負荷応力を増加させてゆくと、 σ_M - Δy 曲線は OABG のようになり、また G 点 ($\sigma_M = 175 \text{ kg/mm}^2$) で除荷し、逆方向に応力を加えてゆくと、IKN の経路で変化する. さらに荷重を増して P 点 ($\sigma_M = -175 \text{ kg/mm}^2$) で除荷し、 σ_M の正方向に再び負荷すると、QRG となり、ループを描く. ここで $\sigma_M > 0$ の領域が順曲げに対応し、他方 $\sigma_M < 0$ の領域が逆曲げになる.

処女材の σ_M - Δy 曲線は、OAB であるから、残留変位 Δy が 0.1 mm になる A 点の応力値 K_A が、この処女材の K_b 値である. また、0 点から応力を増加させて B 点に達した後、除荷し、再負荷したときの σ_M - Δy 曲線は CDE となり、この時の K_b 値は C 点より残留変位が 0.1 mm 増加した D 点の応力値 K_D で与えられる. 同様に E 点で除荷後、再負荷した時の K_b 値は K_F である. $K_A < K_D < K_F < \dots$ であるから、順曲げの場合あらかじめ与えた曲げ応力 σ_M の増加によって、 K_b 値は増大する.

B 点に達した後、除荷し、逆方向 (図では $\sigma_M < 0$) に負荷した場合 (逆曲げ) の σ_M - Δy 曲線における K_b 値は K_H であり、 $K_H < K_A$ となる. また G 点ま

Fig. 11. Bending stress-residual deflection diagram.

で応力を加えた後、除荷し (I 点)、逆方向に負荷したときの K_b 値を K_J で示せば、 $K_J < K_H$ である. このように、逆曲げの場合は、あらかじめ与えた曲げ応力 σ_M の増加にともない、 K_b 値が低下している.

また、G 点まで応力を加え、除荷して、I 点より逆方向へ負荷し (逆曲げ)、K 点にいたって除荷し、再び逆方向 ($\sigma_M < 0$) に負荷を加えると (逆曲げ後再負荷)、 K_b 値は K_L ($K_L > K_J$) まで増加する. これを繰返して残留変位 Δy を零に近づけるとたとえば M 点まで負荷し、除荷後に再負荷した場合の K_b 値は K_N となる ($K_N > K_L$). このように、逆曲げによって低下した K_b 値 (K_J あるいは K_H) は、除荷後今度は同じ方向に再負荷することにより、 K_L , K_N のように復元してゆく.

これら一連の順曲げ、逆曲げ、逆曲げ後の再負荷による K_b 値の変化を Fig. 12 に示す. Fig. 12 の横軸 (あらかじめ与えた曲げ応力 σ_M) は、順曲げ、逆曲げの場合は、正方向の応力であり、逆曲げ後再負荷の場合は負方向の応力である. 逆曲げの場合の K_b 値低下の様相は Fig. 3 より、引張応力を加えた場合と類似している. また、曲げの場合、あらかじめ加える曲げ応力 σ_M による残留変位 Δy が大きい場合には、いわゆる上そり、下そりの状態になるが、そのような形状効果に関しては、本実験で用いた K_b 試験機がモーメント直読方式であることなどにより、その影響は問題にならなかった.

冷間加工の程度、すなわち圧延率の影響は逆曲げに

Fig. 12. The same bending and opposite bending.

おける硬化率の差となって現われる．たとえば，Fig. 11 で曲線 JKM の部分は，曲げ応力付加前の材料の履歴に関係し，圧延率50%のものは，30%のものに比し， $\sigma_M/4y$ がたっている．したがって，ばね材は冷間加工の圧延率を可能なかぎり高めた方が後加工に対しても有利である．

4 考 察

以上のように，薄板ばね材に塑性変形を与えると，ばね限界値は著しく低下する．ばね限界値は降伏強度に対応する量であるから，その原因として，たとえば引張塑性変形を与えたとき，引張降伏強度と圧縮降伏強度が同時に低下したか，あるいはどちらかが減少して全体の低下を招いたか（いわゆるバウシंगा効果），が考えられる．その場合，薄板材の圧縮降伏強度は通常の試験片寸法では，座屈強度より大きくなり，直接降伏強度を求めるためには多くの制約を伴う．ここでは応力の作用方向による降伏点の変化を次の曲げ実験で検討する．

塑性変形を与えない薄板Vと引張塑性ひずみ0.5%を加えた試片Dを2枚はり合わせた4つの組合せの試料をつくり，そのおのおのについて K_b 値を比較してみる．そのモデルおよび結果を Fig. 13 に示す．図で (A) は V-V のはり合わせの場合であり， $K_{bA}=54 \text{ kg/mm}^2$ はそれぞれのばね限界値 $K_{bo}=59 \text{ kg/mm}^2$ より約10%小さくなっている．これは接着の影響と考えている．(B) は V-D の組合せで，Dが引張応力側になるよう荷重した場合を示し， $K_{bB}=K_{bA}$ (C) V-D の組合せで，Dが圧縮応力側になるよう荷重した場合である． K_{bC} は K_{bA} の約1/4に低下している．(D) は D-D の組合せで， $K_{bD}=K_{bC}$ であり，また，この結果はFig. 6のデータともほぼ一致している．

以上の実験によって，引張変形を与えた試片のばね限界値低下は (C) で特徴づけられる圧縮応力側の降

Fig. 13. Spring limit of adhered plates.

伏強度の低下，すなわちバウシंगा効果に基因していることが確かめられた．

塑性曲げの場合，逆曲げにおいてはばね限界値が減少する理由も引張塑性変形を与えた場合と同様に説明できる．ただし，曲げの例では，塑性領域が荷重の増加に伴って増大してゆくから，ばね限界値は，Fig. 12 に示すように漸減する傾向をもつようである．

塑性変形によりばね性が失なわれることの実用上の問題としてはつぎの2点が重要である．

(1) 平坦性を得るために行なう低温焼なまし後の機械矯正

(2) 折り曲げ加工などのばね成形加工

本報では(1)について若干の考察を加える．

低温焼なまし，時効処理などの熱処理後再圧延 (Skin pass) を行なうとばね限界値は Fig. 14 のように変化する．すなわち，ばね限界値は熱処理前にもど

Fig. 14. Spring limit after skin pass.

ることを示している．また，再圧延の圧延率を増せばほぼ熱処理しないものの特性と同じ割合で硬化が進む．それゆえ，材料の製造に際して，ばね性を確保するためには，冷間圧延後矯正，熱硬化処理の順に工程を進めることがたいせつである．なお，再圧延の実験は張力なしで圧下力のみを加えて薄板を伸ばしたので，通常の張力付圧延と異なっている．このため，結晶粒はすべり面のみが圧縮面に一致する方向にすべり回転したことになるが，このような組織の問題をも含めて，熱処理後再圧延によるばね限界値低下の現象と引張りあるいは曲げ変形によるばね限界値低下のそれとの対応はさらに今後の検討にまたねばならない．

また，坂本は洋白ばね材に関し，再圧延後再熱処理した場合のばね限界値の回復を報告しているが，回復の温度条件については別の機会に報告する．

5 む す び

薄板ばね材のばね限界値が引張り，逆曲げ，再圧延などの塑性変形を受けた場合，著しく低下する事実注目し，低下の程度と要因効果について実験ならびに検討を行なった．この結果，

(1) 薄板ばね材に引張り，逆曲げなどの塑性変形を与えると，ばね限界値は 30 kg/mm^2 以下まで低下する．引張塑性変形付与の場合は， 0.2% の永久ひずみ

を与えるとばね限界値は低下し，それ以上のひずみに対してばね限界値は一定となる．他方，曲げ塑性変形（逆曲げ）を増加させると，ばね限界値は測定困難になるまで ($10 \sim 5 \text{ kg/mm}^2$) 低下し続ける．

(2) 板厚，板取方向，熱処理の種類と有無，圧延率が異なる試料も，引張り，逆曲げの塑性変形によって，若干の差があるが，ほぼ一定のばね限界値に低下する．

(3) 引張り，あるいは曲げの塑性変形によるばね限界値低下の原因が，バウシニング効果に基づくこと，などが確かめられた．

継電器ばねは，実用の場合，逆曲げの状態で用いられるものが多いので，ばねのへたりの見張り，あるいは過負荷を加えて硬化させるとか，再熱処理を施すことによってばね性を高める考慮が必要である．

終わりにご指導いただいた電気通信研究所伊藤宅内機器研究部長，高村継電器研究室長，ご援助賜った山田機構部品技術研究室調査員に心からの謝意を表する．

(昭和44年9月1日 第13回材料研究連合講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 三島良績，金属材料，7，2.
- 2) 坂本光雄，日本金属学会会報 2，2，76，(1963).