薄板ばねのばね限界値に及ぼす残留応力の影響

(その2 ステンレス鋼板について)

The Effect of Residual Stress for Spring Limit Value of Materials for Thin Flat Spring (Part 2 Stainless Steel Strips)

西畑三樹男*・大竹 重昭**・奥村 卓男**

Mikio NISHIHATA・Shigeaki OHTAKE・Takuo OKUMURA

1. ま え が き

通信機器用ばねは、機器の小形化・高速化に伴ってその材料はますます薄く、かつ細線化される傾向にある。このため、ばね材料の表面の問題を無視することはできない。

そこでさきに筆者らはその一方法として、銅合金ばねの残留応力とばね限界値の関係について検討し、残留応力分布状態が、表・裏面で異なった場合、応力負荷方向により、とくに素材にくらべて高いばね限界値が得られることを報告した¹⁾。

本研究は、前報に引き続き、薄板ばねのばね限界値と残留応力の関係を明らかにすることを目的として、冷間加工した、板厚 0.15 mm のばね用 18-8 ステンレス鋼板について、残留応力とばね限界値、ヤング率ならびに組織変化について検討したものである。

2. 実験試料

実験試料は、最終板厚 0.15 mm のばね用 18-8 ステンレス鋼板で、表 1 および表 2 にその化学成分および機械的性質を示す。冷間加工は、最終ロール直径 10 mmφ、

表 1 化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe
0.06	0.58	1.12	0.028	0.007	9.02	18.18	残

表 2 機械的性質

加工度 (%)	引張強さ (kg·f/mm ²)	伸び (%)	ビッカースかたさ Hv(0.3)
20	91	31	296
40	108	4	344
60	133	1	384
80	154	—	437

* 日本電電公社武蔵野研究所

** 安立電気(株)

デフレクタロール直径 100 mmφ、巻き取り径 400 mmφの逆張力 6 段圧延機を用いた。加工度は 20, 40, 60, 80% で板幅は 320 mm、圧延時の張力は、引張強さの約 1/3 とした。その加工条件を表 3 に示す。なお、各加工度とも同一そり方向で、下そり（下に凸の場合を下そりと呼ぶ）の状態を示し、板幅方向におけるそり量は、長さ 100 mm に対し 1.0 mm～2.0 mm 程度である。

3. 冷間加工したステンレス鋼板の加工度と残留応力の関係

ここでは、冷間加工したばね用 18-8 ステンレス鋼板の加工度と残留応力の関係を明らかにするために、前報と同様に Treuting と Read の理論²⁾を応用した層除去法を用い各加工度の残留応力を測定した。なお、測定誤差を最小におさえるため、残留応力測定用試験片は、0.15×5×100 mm タンザク状試験片とし、圧延方向に

表 3 加工条件

加工度 (%)	工 程 (mm)
20	1.5 → $\frac{*5}{0.76}$ → $\frac{*5}{0.38}$ → $\frac{*5}{0.195}$ → $\frac{*1}{0.15}$
40	1.5 → $\frac{*5}{0.5}$ → $\frac{*5}{0.25}$ → $\frac{*2}{0.15}$
60	1.5 → $\frac{*5}{0.76}$ → $\frac{*5}{0.38}$ → $\frac{*3}{0.15}$
80	1.5 → $\frac{*5}{0.76}$ → $\frac{*4}{0.15}$

* 1: 1パス 圧延時張力 F.T. 30 kg·f/mm² B.T. 21 kg·f/mm²

* 2: 2パス “ “ 33 kg·f/mm² “ 23 kg·f/mm²

* 3: 3パス “ “ 40 kg·f/mm² “ 28 kg·f/mm²

* 4: 7パス “ “ 50 kg·f/mm² “ 35 kg·f/mm²

* 5: 焼鈍酸洗をそれぞれ行なった後圧延

a: 9.50～10.70 mmφ (ワークロール)

b: 400 mmφ (巻取りロール)

c: 100 mmφ (デフレクタロール)

図1 SUS 304 の加工度と残留応力分布

対し平行方向に切断により採取した。また、試料のそり量をそろえ、ばらつきを少なくするために、板幅方向両端部 20 mm を除いた。

図1に各加工度の板厚方向における残留応力分布を示す。ばね用 18-8 ステンレス鋼板の応力分布は、銅合金ばね材料の分布状態とほぼ同様な分布を示すが、加工度によって各部の応力状態が異なる。加工度 40% 以上になると表面層は圧縮残留応力となり、表面より 2~3 μm 入った部分 (A点、図2参照) に引張残留応力の最大値がある。しかし、加工度 20% の場合、最表面層は 15~18 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ と引張応力を示し、表面より 3 μm 入った層に引張残留応力の最大値、約 20 μm 入った層に2段目のピークがあらわれる。この引張応力の最大値を示す位置は銅合金ばねと異なり、約 1~2 μm 表面層に近いところに観察される。また、これらの加工度と各部の残留応力の変化を細部にわたって考えると、図2の上部に示すような、板の3点の応力に分けることができる。すなわち、①最表面層の応力、②表面から 2~3 μm 入ったところの最大値 (A点)、③板の中心部の応力、により整理すると、図2のような関係になる。A点および中心部の応力は、加工度に対しほとんど変化しないとみられるが、板の最表面層の応力は加工度の増加とともに急激な圧縮残留応力の増大を示す。加工度 20% での表面残留応力値は、引張応力で約 15 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ であるのに対し、加工度 40% では圧縮応力で -5 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 、60% では -25 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 、80% では、板の表・裏面で残留応力値が異なるが、一面では -60 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 以上の応力値となる。

図2 SUS 304 の加工度と各部の残留応力

このように、冷間加工したばね用 18-8 ステンレス鋼板の残留応力は、加工度とともに増大し、強加工をほどこすほど表面層は引張から圧縮残留応力に変化し、さらに増大する傾向がみられる。しかし、板の中心部およびA点では測定値に変化は認められなかった。

4. 冷間加工したステンレス鋼板の加工度とばね限界値及びヤング率の関係

ばね限界値の測定は、前報と同様取り扱いの容易なシーメンス型ばねたわみ試験機を用いた。

図3にばね用ステンレス鋼板の加工度とばね限界値およびヤング率の関係をそり方向別に示すが、ヤング率は上そり、下そり方向に関係なく、17,000~18,000 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ である。一方、ばね限界値は加工度とともに増加する傾向がみられる。しかし、板そりの差は不明瞭であり、加工度 20% では上そりの方が、加工度 40% 以上では下そりの方が 2~5 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 高い値となる。なお、 Kb' 値は実測ヤング率 E を乗ずる前のばね限界値であり、実測 $E \times Kb' = Kb_{0.1}$ の関係にある。

また、従来から冷間加工したステンレス鋼板は、加工度と板取り方向に依存するといわれている³⁾。図4は加工度とばね限界値およびヤング率の関係を各方向別試料について示したものであるが、ヤング率は板取り方向の

図3 SUS 304 の加工度と Kb, E の関係

図4 加工度とヤング率及びばね限界値の関係

影響が大きく、いずれも 0° 方向より 90° 方向の方が約 $2,000 \sim 3,000 \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2$ 程度高い。また、加工度の効果は、 90° 方向試料では増加するが、 0° 方向試料では加工度が増すとわずかに低下する傾向がみられる。ばね限界値もヤング率と同様板取り方向による差異が大きく、いずれも 90° 方向が、 0° 方向にくらべ $15 \sim 20 \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2$ 程

度高い。加工度の効果は 90° 方向は直線的な増加がみられるが $45^\circ, 0^\circ$ 方向では漸増している。

5. 冷間加工したステンレス鋼板の層除去厚さとばね限界値及びヤング率の関係

ここでは、前述した層除去法により、供試料の表面層を除去していった時の層除去厚さとばね限界値 ($Kb_{0.1}$) およびヤング率の関係について検討した。

図5に層除去後試料板そりと応力負荷方向を示す。測定試料は圧延方向に対して平行方向に採取した $0.15 \times 10 \times 100 \text{ mm}$ タンザク状試験片である。層除去は、表面層より $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ごとに表面圧縮残留応力層を完全に除去するまで行なった。また、層除去は試料の表面のみ行なった場合、裏面のみ行なった場合および両面より同時に行なった場合の3通りとし、応力負荷方向は図に示すように、上そり、下そりに対して、それぞれ層除去面を応力負荷面とした場合と反対側にした場合について求めた。なお、試料の表面とは下部ワークロールに接する面であり、裏面とは上部ワークロールに接する面である。

図6に、一例として片面エッチングし応力負荷方向は上そりで層除去面とした場合の各加工度における層除去厚さとばね限界値の関係を示す。層除去厚さ $1 \sim 2 \mu\text{m}$ の点で $1 \sim 2 \text{ kg} \cdot \text{f}/\text{mm}^2$ 程度のばね限界値の増減が認められるが、これは測定誤差内の変化であり、層除去厚さの変化によるものではない。

図7に、両面エッチングした場合の一例を示す。供試料は応力負荷方向を上そりとした場合であるが、片面エッチングした場合と異なり、ばね限界値の変化が明瞭にあらわれ、層除去厚さの増大とともにばね限界値は低下

a) 残留応力分布

b) 応力負荷方向

図5 層除去後の残留応力分布及びそりと応力負荷方向

図6 層除去厚さとばね限界値の関係

図8 層除去厚さとヤング率の関係

図7 層除去厚さとばね限界値の関係

する傾向にある。とくに加工度 20%, 40% でその変化量は大きくあらわれ、層除去厚さ約 10 μm で 10~20 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ の低下を示す。一方、加工度、60%, 80% は変化量が少なく、約 3~5 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ の低下となる。この両面エッチングによる変化はとくに加工度 20%, 40% の場合に顕著にあらわれることから、18-8 ステンレス鋼の冷間加工による組織変化 (F.C.C. から B.C.C. への相変態) との関連によるものと考えられる。

図8に、両面エッチングしたときのヤング率の変化を示す。図からわかるように、ヤング率は板そりおよび応

力負荷方向と無関係に、層除去厚さを増すとともに低下する傾向がみられる。この低下の割合は、片面エッチングした場合より両面エッチングした場合において顕著であり、加工度については、強加工をほどこした 60%, 80% より加工度の低い 20%, 40% に顕著である。このときのヤング率の低下量は 2,500~3,000 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ であり、とくに表面層より 4~6 μm 層除去を行なうと急激に低下する。また、加工度 60% では、層除去厚さ 10 μm で約 1,500 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 程度、80% では約 500 $\text{kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ の低下を示し、その低下の傾向はほぼ直線的であり、加工度 20%, 40% とは明らかに異なった変化を示し、試料内部の相変態がかなり均一に行なわれているものと考えられる。

図9に冷間加工したばね用 18-8 ステンレス鋼板の加工度と B.C.C. 変態の関係についてX線回折によって検討した効果を示す。すなわち、冷間加工されたままの表面は、加工度 40% 以下では、オーステナイト相の F.C.C. であるが、加工度 60% では F.C.C. と B.C.C. が観察される。さらに加工度 80% の表面は、ほぼ B.C.C. になりマルテンサイト変化しているのがわかる。さらにこれらの組織変化が板の内部でどのような挙動を示しているかを知るために、表面層より 1 μm , 10 μm , 30 μm , エッチングした内部をX線回折した結果の一例を図10に示す。加工度 80% では表面および内部ともまったく同じ組織を示しているが、加工度 20%, 40% では、最表面層部分と内部とでわずかに変化していることがわかった。

この冷間加工による組織変化は、図6および図7で述

図9 SUS304 CSP 表材表面のX線回折 (加工度別)

図10 SUS304 CSP 加工度 40% のX線回折 (エッチング量別)

べたばね限界値・ヤング率の変化の傾向と良く一致する。すなわち、試料の表面層と内部がほぼ同じマルテンサイト変態を示す加工度 60%, 80% は、層除去厚さによってばね限界値の変化がほとんどみられないが、最表面層部分でわずかに組織変化を示している、加工度 20%, 40% は、ばね限界値およびヤング率の低下が著しい。

以上述べたように、冷間加工したばね用 18-8 ステンレス鋼板の層除去によるばね限界値およびヤング率の変

化は、銅合金ばね材料ではまったくみられなかった変化であり、相変態を有するステンレス鋼系ばね材料独特の変化であるといえる。なお、冷間加工したばね用 18-8 ステンレス鋼板のばね限界値およびヤング率は層除去量とともに低下し、その低下量は加工度によって異なり、強加工をほどこしたもののほど少ないことから、この変化は冷間加工による組織変化とその程度によって決定されているものと考えられる。

6. 冷間加工したステンレス鋼板の残留応力値とばね限界値及びヤング率の関係

前章では、層除去厚さとばね限界値およびヤング率の関係について述べたが、ここでは、各加工度において両面からそれぞれ約 $20\mu\text{m}$ まで層除去していった時にえられた表面の残留応力値（引張りまたは圧縮）の異なっていく試料について残留応力値とばね限界値およびヤング率の関係を求めた。

図 11 に、ばね用 18-8 ステンレス鋼板の加工度 20%、40%、60%、80% における表面残留応力値とばね限界値の関係を示す。ばね限界値は、残留応力の大きさおよび引張り、圧縮の種類とは関係なく、同一加工度間で一定の値を示す。すなわち、ばね限界値のもっとも高いものは加工度 80% であり、その値は表面残留応力値に関係なく、 $40\sim 50\text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ の値を示す。同様に加工度 60% では $33\sim 37\text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 、40% では $25\sim 30\text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$

の値を示し、もっとも低い値を示すものは加工度 20% で、バラツキをもっとも大きく $15\sim 30\text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ となる。

図 12 に表面エッチングを行っていない素材の圧延のままの試料の表面残留応力値とばね限界値の関係を示す。図からわかるように、圧延のままの試料におけるばね限界値は、加工度に関係なく、表面残留応力値が圧縮で大きいほど高い値を示し、ほぼ直線な関係を示す。また、板そりに関しては、上そりより下そりの方が $2\sim 3\text{ kg}\cdot\text{f}/\text{mm}^2$ 高い値を示している。この関係は、図 2 および図 3 で示したように、加工度と表面残留応力値、加工度とばね限界値がともに直線関係にあることからくるものであり、この図から、冷間加工したばね用 18-8 ステンレス鋼板のばね限界値と表面残留応力値とが直線関係にあるといえない。この変化は、むしろ、残留応力値の変化というより、組織変化の大きさがみかけ上あらわれたものと考えられる。

図 11 SUS 304 の表面残留応力値とばね限界値の関係

図 12 SUS 304 の圧延のままの試料における表面残留応力値とばね限界値の関係

図 13 表面残留応力値とヤング率の関係

冷間加工したばね用 18-8 ステンレス鋼板のばね限界値は、残留応力の大きさとは関係なく、加工度によって生成される試料の表面および内面の相変態の大きさおよび圧延加工による方向性に依存するものと考えられる。

図 13 に表面残留応力値とヤング率の関係を示す。ヤング率の変化はばね限界値の変化と異なり、加工度、残留応力の種類と大きさによる差異はまったくないといえる。

7. む す び

冷間加工したばね用 18-8 ステンレス鋼板の加工度と残留応力および残留応力とばね限界値、ヤング率の関係について検討した結果、次のような結論を得た。

(1) 冷間加工したばね用 18-8 ステンレス鋼板の残留応力は、加工度 20% の低加工領域では、表面は引張り、中心部は圧縮であるが、それ以上の加工度になると、表面、中心部ともに圧縮となり、その値は加工度とともに直線的に増加する。

(2) 圧延したままの試料の残留応力とばね限界値の関係は、圧縮残留応力と相関があり、圧縮応力が大きいほどばね限界値は大きい。

(3) 圧延加工によって生成した表面層を除去して求めた残留応力とばね限界値の関係は、各加工度の試料において、残留応力の大きさおよび種類に関係なく一定値となる。

(4) 1~10 μm まで両面除去した時の層除去厚さとばね限界値およびヤング率の関係を求めると、加工度 20%, 40% では両特性とも厚さとともに低下する傾向が認められるが、60% 以上の試料ではあまり変化しない。

参考文献

- 1) 西畑, 大竹, 奥村: ばね論文集, Vol. 24 (1979) p. 38.
- 2) R.G. Treuting and W.T. Read; J. Appl. Phys., 22 (1951) p. 130.
- 3) 高村, 西畑, 小野ほか: 日本電電公社研究実用化報告, 第 18 巻, 第 3 号 (1969) p. 715.