ばね用ステンレス鋼板のスプリングバックに及ぼす 材料板厚および硬さの影響*

福安義信**, 横江 弘**, 戸澤康壽***, 小野宗憲***

Effects of Thickness and Hardness on Springback of Cold Rolled Stainless Steel Strip for Spring

Yoshinobu FUKUYASU, Hiromu YOKOE, Yasuhisa TOZAWA and Munenori ONO

Stainless steel strip is widely used for flat spring which requires corrosion resistance. SUS301 steel is especially used for the material of a spring as it is given high strength by cold rolling. However, scattering of the angle of bent product due to the large springback of the material appears to be a problem in a certain production. In this study, the effect of slight differences in thickness and hardness on the amount of springback in two lots of SUS301 is investigated. The material specification of each is within the tolerance of JIS G 4313, however, the lots are from different steel makers. L-shape bending test which is similar to a multi-forming mechanism is adopted in this investigation. Results obtained show that the springback angle decreases with the increment of thickness and the decrement of hardness, but the change itself is very small within the same material lot. In addition, the relationship between the springback angle and the hardness does not apply through the different material lots, and it even appears to have a reversed tendency. Therefore, hardness is not appropriate to estimate the springback. Within the present experiment, the springback angle correlates with the stress corresponding to the strain at the surface of bent strip regardless of the difference in not only material lots but also bending direction against rolling direction.

Key Words : Thickness, Hardness, Springback, Flat spring, Stainless steel, L-shape bending

1. はじめに

自動車用ディスクブレーキに使われるパッドクリップなど耐食性が要求される薄板ばねには、一般にステンレス鋼板が使用され、特に SUS301 は冷間圧延により高強度が得られるため、ばね用材料として多く使用されている。しかし、ばね用ステンレス鋼板は通常の材料に比較して成形後のスプリングバック量が桁違いに大きく、材料ロットによるばかりでなく同一コイル内においても製品形状のばらつきが大きいことが問題となる。したがってパッドクリップなどマルチフォーミングによる成形¹⁾に際しては生産開始時または生産過程において、製品の形状寸法チェックおよび機械調整に多大な時間を要している。

本研究ではマルチフォーミングと類似の機構で L 曲げを行い、JIS 規格の許容範囲にある供試材の微少な板厚および

硬さの違いがスプリングバックに及ぼす影響を、同一仕様で納入された鋼材メーカー 2 社の供試材について測定し、それぞれの要因を定量的に調べ、その結果について考察した。

2. 同一コイル内での板厚および硬さの不同

スプリングバック量と関係の深い板厚および硬さが、同一コイル内でどの程度変動しているかをあらかじめ調査した。

対象とした材料は板厚 0.4mm の SUS301-CSP (3/4) H、硬さ範囲 HV370~410 である。Fig. 1 のように全長 560m の圧延コイル後端より 140m の範囲で幅の片側を 4 本の幅狭コイルにスリットし、それらコイルの長手方向 10 箇所より各々 30 個のサンプルを採取し、板厚および硬さを測定した。

原稿受付日 1998年10月12日

* ばね技術研究会 1998年度春季講演会にて発表

** (株)東郷製作所 (Togo Seisakusyo Corporation)

*** 大同工業大学 (DAIDO Institute of Technology)

Fig. 1 Sampling position for measurement of thickness and hardness

Fig. 2 Thickness distribution

Fig. 3 Hardness distribution

Fig. 4 Relation between average thickness and average hardness in each coil

それら 30 個の測定値の平均値をサンプル採取位置に対して示したのが Fig. 2 および Fig. 3 である。これらの図から、板厚はコイル幅縁で薄く、またコイル後端に近付くと厚くなる傾向が見られ、硬さはそれと反対にコイル幅縁で大きく、コイル後端で低下していることがわかる。いまコイルの長さ方向では平均値をとることとして、板幅方向での位置による板厚 (t) と硬さ (HV) との関係と求めると、それらの幅がそれぞれ 1~2% と僅かであるにもかかわらず Fig. 4 のように板厚が大きいほど硬さは小さいことが明瞭に示され、その関係は式 (1) の一次回帰式で表現でき、相関係数は -0.924 と高い相関が認められた。

$$HV = -316.4t + 513.4 \quad (t: \text{mm}) \quad \dots\dots\dots (1)$$

3. L 曲げ加工

3.1 供試材および試験片の採取

供試材は鋼材メーカー 2 社より同一仕様で納入された厚さ 0.4mm のステンレス鋼板 A および B で、それぞれの化学成分を Table 1 に示す。引張特性は、平行部幅 10mm、標点距離 25mm、平行部の長さ約 30mm の試験片を、圧延方向に対し平行 (0° 方向)、 45° (45° 方向)、直角 (90° 方向) の 3 方向から採取し、インストロン型材料試験機 (島津オートグラフ DSS-25T) を用いて引張速度 3mm/min (一定) の条件で求めた。なお伸びの測定にはストレインゲージ式標点間伸び計 (島津製作所製 SG25-50) を使用した。供試材の引張特性および硬さを Table 2 に示す。

曲げ加工試験片は、 $20 \times 50\text{mm}$ の長方形とし、その長手方向を供試材の圧延方向に対し 0° 、 45° 、 90° の 3 方向のそれぞれと一致させ、プレスで打ち抜いて製作した (Fig. 5)。なお、曲げ加工は試験片の長手を曲げる方向とした。

Table 1 Chemical composition of tested stainless steel

Material	(mass%)					
	C	Si	Mn	P	S	Ni Cr
JIS G 4313	≤ 0.15	≤ 1.00	≤ 2.00	≤ 0.045	≤ 0.030	6.00~16.00
A	0.09	0.62	1.01	0.03	0.002	7.00 17.20
B	0.10	0.51	0.94	0.03	0.006	7.33 17.18

Table 2 Mechanical properties of tested stainless steel strips

Material	Direction	Tensile strength σ MPa	σ $\epsilon=0.0625$ MPa	σ $\epsilon=0.08$ MPa	Proof stress MPa	Young's modulus* GPa	Total elongation %	Uniform elongation %	Hardness HV
JIS G 4313		≥ 1130			≥ 745		≥ 5		≥ 370
	0°	1333	1196	1269	1029	187	25.6	18.8	391 ± 5
	45°	1311	1237	1294	1058	-	25.4	14.7	
	90°	1320	1254	1333	1049	196	27.2	19.0	
A	0°	1222	1234	1250	1161	187	29.2	18.8	381 ± 5
	45°	1201	1243	1279	1137	-	27.7	16.6	
	90°	1252	1285	1313	1147	196	30.6	21.6	

* Reference 2)

Fig. 5 Blanking layouts of test piece

3. 2 実験方法

マルチフォーミングにおける曲げ機構をそのまま取り入れた実験装置を試作し、それを用いてL曲げ加工を行った (Fig. 6). その手順は、まず固定カムにより固定ツールを押し上げて試験片を曲げ芯金に固定する. ついで第一曲げカムにより第一曲げツールを押し上げ試験片を90°に曲げる. さらに第二曲げカムにより第二曲げツールを斜め上方から押し出し、試験片を曲げ芯金に押し付けて曲げを完了する. 曲げ芯金角度は80°, 曲げ半径は3mmとした. また第一曲げツールの円弧部分は曲げ芯金の曲げ半径に板厚分を加えた半径3.4mmとし、ツールの進行方向には圧縮ばねを介して約2940Nの圧縮力加わる様にした. 第二曲げツールの押し付け力は1372Nとした. この1372Nは、Fig. 7からスプリングバック量が安定している領域を見極めて決定した. なおFig. 7は事前に押し付け力とスプリングバック量を調査した結果であり、試験片はFig. 5の0°方向で実施した.

加工後の試験片に対する角度の測定は、試験片の曲げ内側の両側面で行い、それらの測定値の平均値を試験片角度 θ' とした. 芯金角度(80°)を θ とすればスプリングバック角 $\Delta\theta$ は式(2)で表される (Fig. 8).

$$\Delta\theta = \theta' - \theta \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 6 Outline of test equipment

Fig. 7 Relation between pressing force of second tool and springback

Fig. 8 Springback $\Delta\theta$

4. 試験結果と考察

硬さが一定のとき $\Delta\theta$ と板厚の関係ならびに、板厚が一定のとき $\Delta\theta$ と硬さの関係を供試材A、B別にFig. 9に示す. いずれにおいても $\Delta\theta$ は曲げ方向、採取方向により明瞭な差があり、0°, 45°, 90°の順に大きくなっている. 曲げ方向が同じ場合の $\Delta\theta$ に対しては板厚は負、硬さは正の相関を示すように見えるが、同一コイル内では板厚、硬さ共に1~2%の変動しかないので、それらの影響は無視できよう. 供試材AとBを比較すると供試材Bのほうが硬さは小さいにもかかわらず、供試材Aより $\Delta\theta$ が大きい.

ここでFig. 9に示した結果から各条件における一次回帰式をそれぞれ求め、ついでそれらの傾きは変えないで同一条件 (例えば、供試材Aの場合は、板厚0.402mm、硬さ390HV) の $\Delta\theta$ の平均点を通るように補正して、切片を決め板厚と硬さに関する $\Delta\theta$ の関係式(3)~(8)を求めた (Table 3). これらの式を用い板厚と硬さが同じ (t=0.4, Hv=390) 場合における供試材AとBの $\Delta\theta$ について比較を行った. その結果はFig. 10に示すとうりで、板厚および硬さが同じであっても材料が異なると $\Delta\theta$ は異なる.

Fig. 9 Springback $\Delta\theta$ for 0° —, 45° —, 90° — bending direction of material A and B

Table 3 Relation between springback, thickness and hardness

Material	Bending direction	Equation
A	0°	$\Delta\theta = 0.0236(Hv-390) - 51.38(t-0.402) + 14.60$ (3)
	45°	$\Delta\theta = 0.0381(Hv-390) - 77.27(t-0.402) + 17.06$ (4)
	90°	$\Delta\theta = 0.0577(Hv-390) - 80.79(t-0.402) + 18.48$ (5)
B	0°	$\Delta\theta = 0.0154(Hv-381) - 23.14(t-0.398) + 15.22$ (6)
	45°	$\Delta\theta = 0.0167(Hv-381) - 57.52(t-0.401) + 17.76$ (7)
	90°	$\Delta\theta = 0.0221(Hv-381) - 59.57(t-0.401) + 19.25$ (8)

Note $\Delta\theta$: Springback(°), Hv: Hardness(HV), t: Thickness(mm)

Fig. 10 Relation between calculated springback and bending direction for given hardness and thickness

この原因として引張りにおける応力-歪関係の影響が考えられる。Fig. 11 は供試材 A および B の引張りにおける応力-歪曲線である。本実験での曲げ条件は板厚が 0.4mm、曲げ半径が 3mm であるので、曲げられた板厚が変化せず、中立面の位置が板厚の中央に存在するとすれば、板表面の歪は $\epsilon = 0.0625$ となり、この歪までの応力によるモーメントと $\Delta\theta$ は相関を持つことになる。いま便宜的に表層だけに注目して Fig. 11 の応力-歪曲線で $\epsilon = 0.0625$ 時の応力を横軸に取り、それぞれの材料の $\Delta\theta$ の値をプロットすると、Fig. 12 のように、供試材のみならず曲げ方向の異なるもの

Fig. 11 Stress-strain curves for 0° - 45° - 90° - direction of material A and B

Fig. 12 Relation between springback and stress (at $\epsilon = 0.0625$) across the material lot and rolling direction

も含めて一つの相関関係が見出された。

ところで、硬さでは $\Delta\theta$ が整理できなかった理由についてであるが、曲げ方向による差に対しては硬さが方向に無関係な量であることから当然である。異なる材料に対しては応力-歪関係から説明できる。すなわち、中村らの実験によれば、応力-歪関係が方向によって異なる場合の取り扱いについては不明であるが、ビッカース硬さは $\epsilon = 0.08$ における応力と相関があり、 $HV = 2.7 \times \sigma_{\epsilon=0.08}$ となる事が報告されている³⁾。Fig. 11 において供試材 A と B、それぞれの方向の応力-歪曲線は $\epsilon = 0.0625$ と $\epsilon = 0.08$ との間で交差しており、それらの歪における応力の大小関係は互いに逆転している。そのため硬さでは $\Delta\theta$ の大小すら適切に表せなかったということが出来る。

スプリングバックにヤング率が影響を与えることは当然である。スプリングバック量とヤング率の関係は、ヤング率を E 、板厚を t 、曲げ角度を θ_0 、加工硬化指数を n 、中立面の曲率半径を ρ 、耐力を σ_e とすれば式 (9) で表せる⁴⁾。

$$\Delta\theta / \theta_0 = \left\{ \frac{3}{(2+n)} \right\} \lambda e^{1-n} - \left\{ \frac{(1-n)}{(2+n)} \right\} \lambda e^3 \cdots (9)$$

$$\text{ただし、} \lambda e = (2\rho/t) (\sigma_e/E)$$

$\sigma_e = 1000 \text{ MPa}$, $n = 0.2$ と一定値を仮定し、ヤング率に対しては Table 2 に示した値と、今回の実験条件である $\theta_0 = 110^\circ$, $t = 0.4 \text{ mm}$, $\rho = 3.2 \text{ mm}$ とともに上式に代入すると、 $\Delta\theta$ は、 0° 方向で 19° 、 90° 方向で 18.4° が得られる。ヤング率の大きい 90° のほうが $\Delta\theta$ は小さくなり、これは実験結果の大小関係とは逆である。この事より、変形抵抗 (応力) の増加による $\Delta\theta$ の増大はヤング率の増加によって低減されるが、量的には僅かであり、本実験の対象の範囲では $\Delta\theta$ に及ぼすヤング率の影響はあまり大きくないといえる。

5. まとめ

- (1) ばね用ステンレス鋼板の同一圧延コイル内では、板厚と硬さに良い相関が認められ、板厚が薄いほど硬くなる。
- (2) L 曲げ加工におけるスプリングバック量は、曲げ方向により違いが認められ、曲げ方向が圧延方向に対して 0° , 45° , 90° の順に大きくなる。
- (3) 曲げ方向が一定であれば、同一コイル内でのスプリングバック量は板厚や硬さにあまり影響を受けない。
- (4) 一般に同一コイル内では、板厚が一定のとき硬さとスプリングバックには正の相関が認められるが、メーカーの異なる材料の場合にはそのような相関は必ずしも認められず、大小関係が逆転することすらある。
- (5) スプリングバック量を支配する材料特性値として硬さを用いることは適切ではない。本実験の場合には曲げ加工時の板表面の歪に相当する応力との間で正の相関が認められた。

参考文献

- 1) 相羽繁生, 野本正猪, 都築章雄, 塑性と加工, 9-380 (1992), 1020
- 2) 日新製鋼株式会社, 月星印ステンレス鋼の高強度
- 銅シリーズNSS 304M2, 304S, 305S, (1995), 20
- 3) 中村雅勇, 戸澤康壽, 塑性と加工, 16-175 (1975), 668
- 4) 戸澤康壽, 塑性と加工, 11-202 (1977), 953