ばね用鋼線の諸特性*

(曲げ, ねじり, 絞り)

On the Characteristics of Spring Steel Wires

(Bending Torsioning and Reduction of Area)

脇嶋 健**・岡田 良規**・中 博生**・高橋 憲一**

Takeshi WAKISHIMA・Yoshiki OKADA・Hiromu NAKA・Kenichi TAKAHASHI

1. ま え が き

ばね用鋼線の性能の中で, 曲げ, ねじり, 絞りの3性能はそれぞればねの加工に関係の深い性質であり, 古くから変遷はあったもののばね用鋼線の検査項目に取り入れられてきていた. 従って鋼線の最も代表的な性能である引張強度との関連を加工度, 熱処理等を変えて追求した幾多の研究が知られているが, いずれも曲げ, ねじり, 絞りの本質に立ち入った研究に進み得なかった憾みがある.

このため我々は想を新たにして昭和54年春, 55年秋, 56年秋の3回の講演会において, それぞれの性能について下記の如き検討を発表してきたのであるが, この間ISOにおいてもばね用鋼線の規格が取りあげられ, この3性能の適用の要否が問題化されるに至っている. 本報告がこれらの問題に参考ともなれば幸いである.

尚本試験は3年の間それぞれ別箇に試験を進めたために各試料に一貫性がないが, 今後各性能に一層の解析が進んだ上で同一試料を用いた総合検討が必要であると思われる.

2. 曲 げ

強度のあるばね用鋼線の靱性をみるには巻き付け,

或いは曲げの検査がよく判るとされ, 例えば戦前の日本の鋼線規格ではその全サイズに亘って繰返し曲げ試験が行われていた. その後本規格は次第に変更されJIS硬鋼線(1980年)では6.0mm以下では同径巻き付け, 6.0mmを超える線ではその径を半径とする円弧に沿い90°2方向曲げと改訂された. これはひとつには太物鋼線の強度が一段とあげられたことに対し靱性を保証する措置であった.

2.1 供試材および実験方法

54年春, 曲げ加工時における鋼線の挙動と題した報告では太物鋼線を対象とし, しかも測定精度の問題から6.0mm SWC種ばね用鋼線を供試材とした. 供試材は分塊圧延鋼片を熱間圧延した9.0mm線材を用い, 線材径で鉛バテンチング処理を行い, 酸洗い, 磷酸亜鉛被膜処理後4パスで冷間連続伸線(線速100m/分)により6.0mmに仕上げた. 化学成分, 機械的性質をそれぞれ表1, 表2に示す.

次に曲げ加工性を精密に測定するため, 25mm外測マイクロメーターのスピンドルを抜き図1に示すよう

表1 供試材化学成分

成分(%)	C	Si	Mn	P	S
SWRH 77B	0.76	0.25	0.77	0.026	0.014

表2 供試材の機械的性質

特 性 供試材熱処理	引張強さ (kgf/mm ²)	降伏強さ (kgf/mm ²)	伸び 〔GL=100mm〕 (%)	絞 り (%)	ねじり回数 〔GL=100D〕 回
伸 線 材	153.6	125.6	5.0	53.8	48
250°C×15分テンパリング材	164.2	151.5	6.5	51.9	28
350°C×15分テンパリング材	157.5	136.9	8.5	50.0	28

* ばね技術研究会昭和54年度春季, 55年度秋季,

56年度秋季講演会で発表

** 南海泉州製鋼鋼索(株)

図1 0.5 mm 標点試料

図2 曲げ試験機

図3 拘束曲げ試験機

に 0.5 mm ピッチのねじ山を転圧して鋼線の長手方向に標線を野書き、曲げ加工後その間隔の変化を拡大投影機を用いて測定した。又一定幅の條をマジックカラーで線表面に予め画いておき、その変化を目視して全体的な変化を知る助けとした。曲げ加工は図2、図3に示す社内の鋼線検査用具を用い、芯金は丸曲げでは R 3 mm、三角曲げでは一辺 10 mm の正三角形（頂点の R 0.5 mm）を使用した。又曲げ角度は 70°, 90°, 120° の3段階とした。ばね加工で生ずる拘束曲げについての治具は凸部山高さ 10 mm、頂点 R 4 mm、凹部谷深さ 10 mm、R 14 mm を用いた。尚よく知られる様に塑性加工では、延性材料のくびれを伴う破断が主要問題となるので、基礎データとするため単軸引張でのミクロ伸びの変化を測定した。

2.2 曲げ加工による断面変化と歪

各種曲げ加工を行った供試線をマイクロカッターで切断し、その断面形状の変化と原断面積よりの減少率を求めた。図4にその例を示す。又図5硬さ分布例に

図4 断面形状の変化

図5 横断面微小硬さ分布図

示したように微小硬度計を用いて断面硬さの変化を測定し、且つ酸腐食試験により曲げ部分の応力腐食割れの発生状況とテンパー処理によるその回復を確めた。

2.3 曲げ加工による背部伸び

図6に示す様な背部伸びを測定した。きつい曲げとなる三角曲げの結果を図7に示すが、テンパリングを行ったものは最大伸びが大きく、0.5 mm 単位で 250°C テンパリング材は 150% の伸びを示した。テンパリング材は背部頂点に伸びが集中してゆくのに対し、伸線材の最大伸びは 90% にとどまり全体として伸びる傾向にあった。

次に 120° 曲げ試料を更に 180° 迄の圧着を行い折れ

図6 背部伸びの測定例

図7 曲げ加工による背部伸び

表3 180° 曲げによる折損の有無と最大伸び

	R3 mm 丸曲げ		三角曲げ	
	折損 有害	最大 伸び	折損 有無	最大 伸び
伸 線 材	無し	208%	無し	230%
250°C テンパリング材	無し	270%	有り	304%
350°C テンパリング材	無し	256%	有り	252%

図8 単軸引張伸び

A 曲げ部外側（引張側）

B 中 央 部

C 曲げ部内側（圧縮側）

図9 曲げ加工部縦断面顕微鏡組織 ×400

の有無及び最大伸びを測定し表3の結果を得た。

尚拘束曲げ試験の結果は引張側に裾をひいた伸び曲線となり、最大伸びはテンパリング材の方が大きかった。

2.4 単軸引張伸び

引張試験によるマイクロ伸びは図8に示すように伸線材が最大伸びを示したが、破断面から離れると小さくなり全体伸びはテンパリング材の方が大きくなった。

2.5 曲げ加工による顕微鏡組織の変化

120°三角曲げ試料の縦断面顕微鏡組織は曲げ背部で繊維組織が非常によく発達し、曲げ加工により引き伸ばされていることがよく判る。この組織は曲げ部外側から1.5mm程度迄で、そのあと原繊維組織となるが、その後の大部分は図9のような圧縮を受けて繊維組織は崩れた様相を呈している。尚この強加工で曲げ部の内側で芯金の接触部から微小クラックが発生しているのが認められた。外側の引張部分にはまだクラックはなかった。

2.6 曲げについてのまとめ

線ばねのコイルングにおいては、その両端の小部分を除いて線の各微小部分は均等な伸び或いは圧縮をうける。一方線の曲げ加工では背面に局部的な大きな伸びが発生しその値は左右へ漸減してゆく。高引張強度の鋼線でもこの伸びに耐える靱性に不足する材料は折損を起す。本試験はJIS規格改訂との関連と測定精度から80Cの6.0mmという太物鋼線を用い、主として次の5点を明かにした。

1) 曲げによる引張部分となる背面伸びは、低温焼鈍を行った場合に局部伸びが大きく、形状として鋭い形が得られる。この場合R 0.5mm 120°曲げで最大伸びは150%以上に達する。

2) 曲げ部分の断面形状は丸断面から四隅の膨らんだ四角状に変化し、この傾向は低温焼鈍を行なったものほど著しい。

3) 曲げ加工による硬さの上昇度は、圧縮側より引張側において著しい。

4) 顕微鏡組織は、曲げ背部で繊維組織が更に発達するのに対し曲げの内側では崩れる。

5) 局部伸びについては、単軸引張りでは伸線材がテンパリング材より大となり、曲げ背部引張りではその逆となる。

3. ね じ り

線をねじってその靱性をみる方法は、その試験が容易なこともあって昔から行なわれ、曾っては鋼線においても行なわれてきた経緯もあり、鋼線では早くから伸線加工度のある部分で低下が生ずる問題として、テンパリングでの変化と併せて各製造条件の関連性を追求されてきた。しかし破断迄のねじり回数を調べる

所謂ねじり試験は実際のばねで起り得ない現象を追うものであり、又特殊鋼、合金鋼では少ない数値で破断することもある。次第に試験の目的も表面底の検出等に移行しつつある。ISO欧州案にねじり試験が取りあげられなかった経緯はわからないが、ばね用鋼線には実際上ねじり現象がからむため本検討を進めた。

3.1 鋼線とねじりモデル

55年秋、鋼線のねじりについての考察と題した報告で実用上の問題としてねじり試験で行なわれるような強度のねじり加工ではないものの1) コイルばね製作ならびに作動時のねじり 2) 引張ばねの端加工かん立て部の局部的なねじり 3) 加工ものに使用される直線品製造に際し回転伸直法を用いた場合の直線に生じているねじりの3点は当然検討の対象となるとしてねじりモデルからみていった。このモデルの幾何解析ではねじりを線表面の微小部分の変化として捉えうる。つまり図10において線分 A_0B_0 が A_0B_1 と伸びること

図10 ねじりモデル

図11 ねじりモデル

表4 ねじり回数と伸び
($l=100D$)

ねじり回数	接線角度	伸び%
5	8°56'	1.2
10	17°21'	4.8
15	25°14'	10.5
20	32°08'	18.1
25	38°08'	27.1
30	43°18'	37.4
35	47°43'	48.6
40	51°26'	60.3
45	54°45'	73.2
50	57°31'	86.2
55	59°56'	99.6
60	62°03'	113.4
65	63°54'	127.3
70	65°33'	141.6

となる。又ねじり試験では図11に示したように表面にあらわれる。マーキングしておいた標線の接線角度から表面伸びが計算できる。表4に示したように40回のねじり回数は表面伸び60.3%に達する。従ってねじり試験は既に充分伸線加工され、その繊維組織で適当な強度靱性が与えられた鋼線に更に表面で数10%に及ぶ加工を行なったその後の変化を見ているわけで、実際そのような加工が行なわれていない以上、問題のある試験ということになる。

3.2 60C, 80C 鋼線の一般的なねじり特性

太物鋼線を対象として最近の上記鋼線が、加工中の段階を含めてどのようにねじり特性を示すかを検討した。

使用材料はいずれも7.0 mm線材を用いて鉛パテンチングを行ない4パスで4.0 mmまで伸線した。供試

表5 供試材化学成分 (%)

成分 材料	C	Si	Mn	P	S
60C	0.61	0.22	0.46	0.012	0.011
80C	0.77	0.23	0.75	0.026	0.010

表6 供試材の機械的特性

C別	線径 mm	引張強さ kgf/mm ²	伸び%	絞り%	ねじり 回数
60C	6.2	120.6	5.4	46.5	45.0
	5.4	130.0	5.3	52.6	41.0
	4.7	141.0	5.3	46.4	38.2
	4.0	151.0	4.7	54.3	41.9
80C	6.2	143.4	4.6	34.2	17.0
	5.4	156.8	4.7	43.7	31.3
	4.7	170.0	3.8	47.6	29.4
	4.0	187.2	3.2	48.2	31.1

図12 供試材の機械的特性

材の化学成分、機械的特性を表5、表6に示す。尚標準工程では60Cは7.0 mmパテンチングで仕上り、4.0 mm・80Cは同様に4.5 mm上りである。図12、表6に示すように60C鋼線は中間工程を含めて充分高い数値のねじり回数を得ている。80Cは第1パスでねじり回数が低く従来のパターンがでている。これは線材が真円でないため、第1パスではまだ、表面付近は均一な繊維組織の形成が行なわれ難く、80Cだけにその影響が大きいものと考えられる。

但し仕上りではいづれにしてもJISの3.5 mmを超えるサイズでの10回以上の規格は満足している。

3.3 ねじり試験における諸問題

3.3.1 ねじりの進行

鋼線のねじり試験を行ないながら写真撮影を行なう場合、赤マジックで標線を入れておくことでどのように線のねじりが進行してゆくかがよく判る。図13にその一例を示した。いろいろな線で行なうとねじりの様相の変化がつかめてくる。尚ねじり試験を目視してすぐ気がつくのは発熱点の移動である。線表面の残留潤滑剤が燃焼して煙があがりこれが移動する。表面のねじり加工が次々に進むから適当な温度測定器を用いるとねじり試験中の線の表面温度分布が測定される。

高温の山は1ヶ所とは限らない。最終で2点破断する場合は2ヶ所で現われる。この発熱をおさえるために氷の小塊で絶えず冷却しつつけると、ねじりがある点から一方に移動し再び戻ってきた時点で連続性を失って局部ねじりで破断する現象が生ずる。つまりねじり試験は表面を強烈な加工により発熱させながら行なう特殊な試験であるといえる。

3.2.2 ねじり試験の回転数

ねじり試験はそのねじり速度をおとせば破断迄のねじり回数をあげることでできる試験であると言われていたが、最近の鋼線ではその影響が僅かとなってきている。70C 4.0 mm鋼線の例を図14に示した。

3.3.3 ねじり試験のつかみ間隔

一般にねじり回数はつかみ間隔に比例しているから100Dに換算しておけばよいと言われているが、ねじり試験が特殊加工での一種のむら見試験である以上つかみ間隔の狭い方がよい数値が得られるわけである。上記の70C 4.0 mm線でも図15のように50D, 100D間には明らかに差がある。

3.3.4 ばねのかん立てによって生ずるねじれ

引張ばねのかん立ては単純に考えればコイル外径の1/4長における90°のねじりである。この全長に亘って均一にねじれるとすればD/d=10のばねでは、ねじり試験のつかみ間隔100dに換算して3回強のねじり回数に相当することとなる。しかし各部分で異なる分力となるから、実際には局部的により多いねじりが生

図13 ねじりの進行状況

ずる。これはマーキングを行って実測することができる。

3.3.5 回転伸直機によって生ずる線のねじり

回転伸直機には伸直機の回転駒による短いピッチの螺旋状の駒疵と線のねじりによる長いピッチの螺旋マークの二種類が共存する。我々の回転伸直機は中型で4.0 mmには適さなかったが、より細いサイズで直線性と線のねじりの関係および回転伸直による線径の変化を追った結果を参考のため表7に示す。

3.4 ねじりのまとめ

本報告においてもねじりモデルから始めて実際のねじり試験の問題点を調べていった。現在、高炭素鋼線

の製造は製鋼から圧延に至る技術の進歩に支えられて製品の強靱性が向上し、ねじり試験の規格数値を大幅に上廻り、この試験で表面欠陥も殆んど検出されない。しかし、ISO 原案との関連もあり疑問点は更に解析を進めておく必要がある。尚亜鉛めっきを行った各種鋼線についても現規格との関連で別途実験を行なったが、この種の材料はばね用としての用途が未だ少いの

4. 絞 り

引張試験における破断面の原断面に対する減少率である絞り値は、靱性を示す値として鋼材に古くから適

図14 ねじり試験におけるねじり速度の影響

図15 ねじり試験におけるつかみ間隔の影響

表7 回転伸直による機械的特性 (80C 2.6 mm)

	伸直前	伸直加工度			
		小	中	大	過大
線 径 mm	2.5815	2.5950	2.6008	2.5995	2.6053
ねじれ角度	—	—	3°	3°	7°30'
ねじれピッチ mm	—	—	156	156	62
引張強さ kgf/mm ²	173.1	168.6	165.4	165.8	163.2
ねじり回数	35.25	38.25	32.0	39.0	33.25

図16 測定方法と絞りの関係

用され、鋼線の JIS でも冷間圧造用鋼線で重要視されている。しかし、ばね用鋼線ではドイツが DIN で規定し、それが ISO 原案の主張につながるが、JIS の硬鋼線ではその必要性を認めていない。もっともあとで強加工を行なう平織金網やワッシャ材には需要家との特定のとりきめを行なう場合があり、又鋼塊材、鉛パテンチングに対して連続製造、ステルモア圧延*** という近年の技術進歩とも関連性があり、検討の必要があ

ると考える。

4.1 絞り測定における精度

鋼線の絞り測定はノギスを用いる場合とエッジマイクロメーターを用いる場合があるが、56 年秋に鋼線の絞り特性について報告を行なった際には更に拡大投影機による測定を加えた。

予備試験は 7.0 mm 線材から 7 バスで 3.2 mm 迄伸線し、各サイズにおいて、上記の 3 種類の治具の測定

表8 供試材の化学成分(%)

No.	材 料	熱 処 理	記 号	線 径	C	Si	Mn	P	S
1	鋼 塊 材	鉛パテンチング	SWRH 77B	7.0 mm	0.79	0.24	0.82	0.014	0.011
2	鋼 塊 材	ステルモア	SWRH 82B	8.0 mm	0.82	0.23	0.76	0.018	0.009
3	連続铸造材	鉛パテンチング	SWRH 77A	7.0 mm	0.80	0.26	0.49	0.011	0.012

精度を各 20 試料について行なった。図 6 はこの結果を示したもので、投影機、エッジマイクロメーター、ノギスの順で絞り値は下がり測定精度が悪化してゆくことが判る。又線径が細くなる程その差は開き、1.2 mm の測定例ではノギスと投影機の差は 12% にもなる。従って絞りの特性検討はすべて投影機測定法によった。

4.2 供試材及び実験方法

供試材は表 8 に示す 3 種類の 80C 材を用いた。鉛パテンチングにおけるパーライト組織の絞りに対する影響をみるために No. 1 の同一鋼塊材を用いて 2 種類の鉛温度でパテンチングを行なった。熱処理に関しては、No. 2 のステルモア処理線材と No. 1 の鉛パテンチング材との比較を行なった。原材料の製造方法に関しては、No. 3 の連続铸造材と No. 1 の鋼塊材との比較を行なった。

線材径は鋼塊材、連続铸造材はそれぞれ 7.0 mm、ステルモア材は 8.0 mm とし、約 20% 毎の落しで 3.2 mm 迄伸線した。鉛パテンチング処理を行なったもの

は更に 2.6 mm 迄伸線した。

4.3 鉛パテンチング温度と絞り値

図 17 は鉛パテンチングの温度と絞りの関係の減面率による変化を示したものである。鉛パテンチング条件は 940°C 加熱、鉛温度 530°C のパテンチングと 940

図 17 鉛温度と絞り値
(炉温 940°C 加熱後鉛温度 530°C, 570°C でパテンチング)

図 18 鉛パテンチング材とステルモア材の絞り値

図 19 鋼塊材・連続铸造材の絞り値
(570°C 鉛浴パテンチング)

表9 各絞り率の標準偏差

鉛パテンチング材	絞り(%)	50.3	49.7	51.5	53.5	54.7	56.7	57.4	54.0	51.3	48.1
	標準偏差	0.64	0.54	0.66	0.63	0.83	1.32	1.95	1.42	1.49	1.36
ステルモア材	絞り(%)	43.1	42.2	42.4	45.3	48.9	51.6	52.1	52.9	50.2	
	標準偏差	1.07	1.42	1.85	2.18	2.14	2.03	2.52	2.49	2.85	

℃加熱，鉛温度 570℃ のバテンチングとした。

この結果によると，高い鉛温度のバテンチング材は，低減面率範囲の絞り値が低く加工度が進むと共に低い鉛温度のバテンチング材の絞り値に接近する。但し，最高絞り値は，より高減面率側のサイズにずれる。

4.4 ステルモア材の絞り値

引張強さレベルを合わせるために1ランク線材径をあげたステルモア材と鉛バテンチング材の絞り値の挙動を図18に示す。又各絞り値の標準偏差も併せ表9に示す。ステルモア材は鉛バテンチング材に比べ，全体に低い値を示し，又そのばらつきは大であった。

4.5 鋼塊材と連铸材の絞り値

連铸材と鋼塊材を 570℃ で鉛バテンチングを行ない比較した。図19からは鋼塊材の方が絞り値が高位にある。しかし，製造メーカーを異にするため絶対値の差をこのデータだけで断定することはできない。

4.6 絞りのまとめ

ばね用鋼線の絞り値は，今回，鉛バテンチングにおける鉛温度，熱処理方法及び原材料の製造方法について検討を行なった。鉛バテンチングにおける鉛温度の

影響は，高い温度 570℃ で処理した方が，伸線前では低い絞り値を示すが，伸線後の最大絞り値は差がなく，その値は 530℃ 鉛バテンチング材に比べ高減面率側に移行する傾向が見られた。一方ステルモア材，連铸材，従来の鋼塊材を鉛バテンチングした材料に比べ，低い絞り値を示した。しかし，絶対値に関しては DIN の規格値を，充分満足しており，又鋼塊材を鉛バテンチングした材料との相対値は製造メーカー及びロット間による差異を調査していないため，今後さらに検討を加える必要があると考える。

5. む す び

ばね用鋼線の基本的特性とされる「曲げ」「ねじり」「絞り」について，各々の本質並びに実用に際しての諸問題を調査した。現在検討されている ISO に於ける規格設定の参考となれば幸いである。ばね加工時の条件設定及び加工限界の把握に関しては，上記3特性の関連を更に深く解析し，総括的に考える必要があるが，後人の活躍に期待したい。