〔技術論文〕

高引張強さの冷間引拔 Si-Cr ばね鋼線

High Tensile Hard Drawn Cr-Si Steel Spring Wire

本 田 一 郎* 鈴 木 栄 三*
I. HONDA E. SUZUKI

井 上 和 政* 石 栗 利 宏*
K. INOUE T. ISHIGURI

小 泉 義 明*
Y. KOIZUMI

1. はじめに

Si-Cr 低合金鋼の特性である耐熱性にあわせて、優れた機械的性質、靱性あるいは衝撃抵抗に着目して、われわれは数年来、Si-Cr 鋼オイルテンパー線を製造してきた。わが国にて、近時、エンジンの小型化、高速化が行なわれ、特に小型自動車の空冷エンジンの弁ばね、あるいは、産業機械としての重車輛の大型化、高馬力化、高能率化などにともない、より高温、高応力下で使用されつつあるクラッチばねなど耐疲労、耐熱用のばね材料として、この Si-Cr 鋼オイルテンパー線が用いられ、現在すぐれた工業的評価をうけつつある。

このような重要な工業材料である Si-Cr 鋼オイルテンパー線に対し、われわれは、まず、その性能向上を目的として、良好な冷間引拔鋼線の開発から手がけ、その目的をはたした。その結果、新しい熱処理方法としてステップ・パテンチング方法¹⁾を確立し、微細パーライト組織を得ることが可能になり、あわせてピアノ線クラスの高引張強さ冷間引拔 Si-Cr 鋼線に発展せしめてきた。この狙いとするところは Si-Cr 鋼オイルテンパー線の欠点となっている水素脆性の鋭敏性を緩和することによる応

力腐蝕の回避と、常温、または、高温時における耐クリープ性の向上、または、曲げ加工性の改善などについてである。具体的には高温、または、高応力のもとで耐疲労性を要求されるものとか、ヘタリを極度に嫌うもの、あるいは、これらの要求に加えてメッキ処理とか、過度の曲げ加工を必要とする引張ばね、ホーミングばねなどである。

また、用途的には全く異なるがプレストレスト・コンクリート用ワイヤ²⁾として、低レラクセーション性と、若干の耐温度性を有し、今後の発展が期待されている。

2. 供 試 材

線材の化学成分は SAE 9254, ASTM A 401 に規定されたものを使用した。その化学成分を表 1 に示した。供試材の製造工程は図 1 に示すように表面研削とステップ・パテンチングを除いては、一般のピアノ線の製造工程と全く同一である。実験に供した線径は、5.0 mm, 4.0 mm, および 3.2 mm の 3 種類として、3.2 mm のみ引張強さの影響をみるため、3 種類の引張強さのものを試作した。

周知のごとく、重要機能部品としてばね材料に要望さ

表 1 供試材の化学成分 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	備 考
0.54	1.58	0.74	0.012	0.010	0.64	0.06	5.0 mm
0.56	1.51	0.77	0.014	0.009	0.68	0.03	4.0 mm
0.53	1.58	0.78	0.012	0.009	0.67	0.05	3.2 mm
0.51	1.20	0.50	<0.035	<0.040	0.60	—	S A E 9254 (1968)
~0.59	~1.60	~0.80			~0.80		
0.50	1.20	0.50	<0.040	<0.040	0.60	—	A S T M A 401
~0.60	~1.60	~0.80			~0.80		

*鈴木金属工業株式会社

図1 供試材の製造工程

れるものの1つに表面無欠陥がある。欠陥の大半は線材ですでに発生している表面キズと脱炭が主なものである。脱炭はビレットの加熱と線材圧延時を通じて発生し、キズはビレットのキズ取り不足によるか、あるいは、線材圧延時に発生する。また、本鋼種のごとくSiを多量に添加されたものは、炭素鋼に比較して著しく脱炭を生じやすい。そこで、われわれは、製品のキズと脱炭による欠陥をなくすため、製造工程の中にて表面研削機により研削を行ない万全を期している。

なお、比較実験、または、引用したデータはいずれも一般品のなかから試験されたもので、化学成分、機械的性質についてはその都度表示するか、あるいは、実験結果のなかに入れた。

3. 試験項目と方法

3.1 線による試験

冷間引抜過程の機械的性質のほか、表2に示す条件で低温焼鈍した線について、表3に示す試験条件で引張

表2 低温焼鈍条件（線の機械的性質）

線径(mm)	5.0	4.0	3.2
条件			
温度 (°C)	380, 420	250~450	150~450
時間 (min)	30	30	20

(注) 熱風循環炉使用

表3 引張、ねじり試験方法（常温）

	引 張 試 験	ね じ り 試 験
試 験 機	レバー式引張試験機 (ダイヤルゲージ使用)	自動記録式精密ねじり試験機
測 定 項 目	引張強さ (σ_B) 降 伏 点 ($\sigma_{0.2}$) 弾 性 限 ($\sigma_{0.05}$) ヤング率 (E) 絞 り (ϕ) 伸 び (ε)	最大ねじり強さ (τ_B) 降 伏 点 ($\tau_{0.2}$) 弾 性 限 ($\tau_{0.05}$) 剛 性 率 (G) ねじり回数 (Tn)
備 考	(1) チヤック間距離は約 200 mm (2) ダイヤルゲージの標点距離を100mmでS-S曲線から、0.2%, 0.05%のオフセット方法により降伏点、弾性限を測定 (3) 絞り、伸びは破断後の試験片を突合せて測定	(1) チヤック間距離は 50 d (d; 線径) (2) T- θ 曲線から Prandtl の方法により 0.3%, 0.03%のオフセット方法により降伏点、弾性限を測定 (3) ねじり回数は測定値を2倍して100 d で表わした

り、および、ねじり試験を行なった。ただし、加熱ねじり試験は表3で示した方法に加えて、約3分で昇温し、約3分間均熱して試験を開始した。

また、疲労試験はシェンク式疲労試験機を用いて、平均応力 50 kg/mm² で振幅をかえて、5.0 mm, 3.2 mm Bのみについて行ない、表4に示す低温焼鈍のものについて疲労限を求めた。

表4 低温焼鈍条件（線の疲労）

線径(mm)	5.0	3.2 B
条件		
温度 (°C)	380, 420	360, 400, 420
時間 (min)	30	20

3.2 ばねによる試験

3.2.1 ばね仕様

試験には 4.0 mm, および, 3.2 mm を用いた。目的によりそれぞれ表 5 に示すばね仕様表で実験したが、いずれも剛性率は 8,000 kg/mm² と一定にした。

3.2.2 加熱締付試験

応力修正係数を加味せずに表 5 に示したばね仕様で表 6 に示す条件で試験し、荷重減少量から残留せん断ひずみを測定した。

表 5 ばね仕様

	圧縮ばね		引張ばね
線径(mm)	4.0	3.2	4.0
コイル平均径(mm)	28.0	18.6	16.0
自由高さ(mm)	60	43	187
有効巻数	4.5	5.0	—
総巻数	6.5	7.0	35.0
巻方向	右	右	右
ばね定数(kg/mm)	2.59	3.44	1.83

表 6 加熱締付試験条件

線径(mm)	条件	締付応力 (kg/mm ²)	温度(°C)	時間(Hr)	低温焼鈍 (°C, min)	荷重試験(mm)	
						H ₁	H ₂
4.0		49, 60	150, 250	1, 2, 4, 6, 10, 20, 40	350, 30	52	40
3.2		40, 50, 60, 70	150, 200, 250	1, 2, 4, 8, 16, 32, 64	420, 30	38	33

表 7 ばね疲労試験条件(圧縮ばね)

星型ばね疲労試験機使用

	線径 (mm)	低温焼鈍 (°C, 30min)	回転数 (r. p. m)	温度 (°C)	条件(kg/mm ²)		備考
					平均応力	応力振幅	
常温	4.0	350	1,500	—	50, 60	—	応力振幅を変え 4 個のばねが 10 ⁷ 回に耐える時を疲労限とした。
	3.2	360, 400, 420	2,800	—	50	—	
高温	4.0	350	1,000	150, 200, 250	40, 60 80, 90, 100 50, 62.5	20	2×10 ⁶ 回後の残留せん断ひずみを求めた。 4.0mm : n = 3 3.2mm : n = 4
	3.2	360, 400, 420	2,800	150	71.4, 83.3	25.2	

- (注) 1. 高温, 4.0 mm では Cr-V 鋼オイルテンパー線と同一条件で比較した。
 2. 常温, 3.2 mm のみ電気亜鉛メッキしたばねを同一条件で試験した。
 メッキ条件; 青化亜鉛浴 5 Amp/dm², 15 min
 ベイキング条件; 195°C, 2 Hr
 3. 荷重試験は表 6 の条件と同一。

表 8 ばね疲労試験条件(引張ばね)

試験温度	線径 (mm)	低温焼鈍 (°C, min)	回転数 (r. p. m)	条件(kg/mm ²)		繰返し数 (N)	荷重試験(mm)	
				平均応力	応力振幅		H ₁	H ₂
常温, 130°C	4.0	350, 30	500	60, 80, 100	16.5	10 ⁶	197	207

3.2.3 疲労試験

(1) 圧縮ばね 応力修正係数を考慮して表 5 に示したばね仕様で、表 7 に示す条件で目的に応じた試験を行った。なお、1 部亜鉛メッキしたものについて試験した。

(2) 引張ばね 表 5 に示したばね仕様で 4.0 mm についてのみ表 8 に示す条件で試験し、荷重減少量として求めた。

4. 結 果

4.1 ステップ・パテンチングと伸線

さきに述べたように、優れた冷間引拔鋼線を作るには、冷間引拔前の組織が均一な、適当な微細パーライトであることが望ましい³⁾。鉛パテンチングを行なう場合、炭素鋼に比較して変態終了曲線を通過しないで、すなわち、恒温変態の終了が行なわれないで冷却され、残留オーステナイトの生じるような低合金鋼の熱処理に対し、われわれはステップ・パテンチング法を開発した。これは走行処理でパテンチングと同じように行なわれ、高級線材の熱処理には均一な、しかも、安定した組織が得られる方法で、オーステナイト化後連続的に M_s 点直上まで冷却されてのち、再び、鉛浴炉による再加熱、すなわち、残留オーステナイトからのパーライト変態が行なわれ、微細パーライトを得る方法である。しかし、亜共析鋼の場合、連続冷却曲線で示される初析フェライトの析出するような冷却速度で冷却された場合は、初析フェライトと微細パーライトの共存組織が得られることもある。このようにして得られたステップ・パテンチング後の機械的性質は、線径に関係なくおよそ 125 kg/mm^2 の引張強さと、50%の絞りとなる。

つぎに、引拔加工によるSi-Cr鋼線のステップ・パテンチング後の機械的性質の変化をピアノ線と比較して図2に示した。これから、C%の低いにもかかわらずSi-Cr鋼線はピアノ線の場合とほぼ同じような加工硬化を示

図2 減面率と機械的性質の関係
—ピアノ線との比較—

し、80%の減面率をとったのちでも、ピアノ線と同じような優れた靱性をもっていることがわかる。

表 9 冷間引拔後の機械的性質

線 径		5.0 mm	4.0 mm	3.2 mm A	3.2 mm B	3.2 mm C
機械的性質						
引張特性	引張強さ(kg/mm^2)	187.4	176.5	169.9	175.2	187.4
	降伏点 (kg/mm^2)	178.5	141.5	141.6	150.0	161.8
	弾性限 (kg/mm^2)	157.5	108.2	116.2	128.0	135.0
	降伏点比 (%)	95.1	80.2	83.3	85.6	86.3
	弾性限比 (%)	84.0	61.3	68.4	73.1	72.0
	ヤング率(kg/mm^2)	19,750	18,000	18,600	18,200	19,000
	伸 び (%)	3.5	4.5	3.8	3.5	3.0
ねじり特性	絞 り (%)	45.2	58.3	55.6	51.2	54.0
	最大ねじり強さ (kg/mm^2)	94.4	101.0	102.2	105.5	110.9
	降伏点 (kg/mm^2)	85.4	74.0	81.5	83.1	88.7
	弾性限 (kg/mm^2)	62.5	44.4	58.8	61.1	63.9
	降伏点比 (%)	89.5	73.3	79.6	78.7	80.0
	弾性限比 (%)	66.2	44.0	58.2	58.0	57.6
	剛性率 (kg/mm^2)	7,840	7,820	7,800	7,800	7,900
ねじり回数(100d)		20	43	37	36	36

4.2 冷間引抜鋼線の特性

4.2.1 冷間引抜後の機械的性質

表9に冷間引抜後の機械的性質について各線径、種類別に示した。これから本鋼種の冷間引抜後の特性として、特に、めだったものはなく、伸び、絞りなどの靱性も優れており、ピアノ線とあまり変らない。

4.2.2 低温焼鈍の影響

一般の冷間引抜された鋼線で作られるばねに対して、

最も重要なことは線の低温焼鈍による機械的性質の影響を知ることとされている。その意味から、冷間引抜時の減面率の相違、すなわち、引張強さの相違が低温焼鈍により、機械的性質にいかなる影響をおよぼすかをみるため、供試材 3.2 mm の3種類の線について実験した。この結果を引張強さとねじり特性にわけて引張強さ別に、それぞれ、図3、および、図4に示した。これから3種類の供試材はいずれも引張強さに無関係に同じ傾向をもっている。引張特性では各供試材とも、いずれも

図3 引張特性値と低温焼鈍の関係

250°Cで引張強度 (σ_B , $\sigma_{0.2}$, $\sigma_{0.05}$) は最大値に達する。伸びは引張強さの低い 3.2 mm A のみ 350°C まで、3.2 mm B, 3.2 mm C は 400°C まで低温焼鈍により冷間引抜後のものよりも降下するが、これらの温度を越えるといずれも急激に回復する。絞りはいずれの供試材も引張強度の最大値の得られる温度、すなわち、250°C まで徐々に回復し 400°C で冷間引抜後とほとんど同じ値に達する。さらに、温度が上って 400°C を越えると再び降下している。しかし、絞りの降下は 3.2 mm A よりも引張強さの高い 3.2 mm B, 3.2 mm C が大きくなっている。ヤ

ング率の傾向としては試料間に低温側で若干の相違がみられるが、300°C を越える低温焼鈍を行なえば、試料間に差はなくなり、およそ 20500~21500 kg/mm² 程度になる。

以上の特性のほか、なかでも最も著しいのは降伏比、弾性限比が冷間引抜鋼線として、他に例をみないほど著しく高い値を示すことである。すなわち、250°C で両比とも最大値に達し、それ以上の温度でもあまり変わらず、それぞれおよそ 99%, 92% を維持していて、しかも、試料間に無関係なことである。

図4 ねじり特性と低温焼鈍の関係

つぎに、ねじり特性についてみる。ねじり特性も引張特性の場合と似ていて同じ特長を示している。ただし、引張強度が250°Cで最大値に達するのに対し、ねじり特性では300°Cで得られ、やはり、50°C高くなっている。ねじり回数は200°Cまでに降下して、その後低温焼鈍温度が上昇してもあまり変化しない。しかし、400°Cを越えるとやや回復する傾向をもっている。剛性率は各供試材とも同一傾向をもち、200°Cまで急上昇する。その後温度の上昇とともにわずかに上昇するが、およそ8300 kg/mm²である。なかでも大きな特長は引張特性と同じく降伏比、弾性限比で、供試材によりわずかに異なるが、250~400°Cで降伏比は99%に達し、300~400°Cで弾性限比は98%となるが、3.2 mm Cのみわずかに低くなり250°Cで95%に達してのち、除々に上昇して350~400°Cで98%になる。

4.2.3 ピアノ線と比較した低温焼鈍の影響

このような特長を明確にするためにピアノ線と比較してみる。比較材には3.2 mmのうち、中間の引張強さをもつ3.2 mm Bを用いた。図5に引張特性の比較を示す。これから最大強度を示す温度に50°Cのずれがあることと、降伏比、弾性限比が非常に高いため、引張強さが

図5 低温焼鈍における引張特性の相違—ピアノ線との比較—

低いにもかかわらず、250°C 以上の低温焼鈍を行なったときはピアノ線よりはるかに高くなっていることである。すなわち、降伏比、弾性限比は 200~250°C からは Si-Cr 鋼の方が大きくなり、これをばね材料としてみたときの効果は非常に大きなものとする。しかし、伸びの相違は著しいが、その他の特性には大きな差がない。伸びはピアノ線が 200°C をこえて回復するのに対し、Si-Cr 鋼の回復は 400°C をこえて起る。

同じ比較をねじり特性についてみると図 6 になる。当

図6 低温焼鈍におけるねじり特性の相違
—ピアノ線との比較—

然のことであるが同じ特性をもつことがわかる。ただ、ねじり特性の場合、最大ねじり強さは 50°C の差があるが、その上昇率はピアノ線の方が大きく、Si-Cr 鋼の場合にはわずかな変化しかみられない。しかし、降伏比、弾性限比の上昇には違いがあり、ピアノ線が低温焼鈍温度とともに増加するのに対し、Si-Cr 鋼は 150°C 以上の温度で急激に上昇する。そして、ピアノ線が 200~250°C で最大比率を示してのち、温度とともに低下するのに対し、Si-Cr 鋼は降伏比が 250°C、弾性限比が 350°C で最大値を得て、しかも、温度が上昇してもこれを持続する。ねじり回数はピアノ線の方が全般的によく、250°C を過ぎて回復するのに対し、Si-Cr 鋼は 400°C まで回復

しない。

つぎに、引張強度およびねじり強度について、それらの比率とともに低温焼鈍による上昇になおして比較すると図 7、図 8 のごとくなる。まず、図 7 から両鋼種の最

図7 引張強度、降伏比、弾性限比の低温焼鈍による変化率

—ピアノ線との比較—

図8 ねじり強度、降伏比、弾性限比の低温焼鈍による変化率

—ピアノ線との比較—

大値のずれは明瞭で引張強さで50℃、降伏点、弾性限で50～100℃の差が明らかになるが、上昇率では Si-Cr 鋼が弾性限のみやや少ないにもかかわらず引張強さ、降伏点では変わらない。しかし、引張強さが冷間引抜後の値より低くなるのは両鋼種に差があり、ピアノ線の場合50℃低い温度となっている。また、最大上昇の得られる低温焼鈍測定範囲は、はるかに Si-Cr 鋼の方が広い。これを降伏比、弾性限比の上昇率でみると両者にあまり差がないが、上昇の始まる温度、または、最大上昇率の得られる温度が異なり、Si-Cr 鋼の方が高温側にある。図8からねじり強度の比較をみると引張強度の場合と異なり、上昇率は各値ともピアノ線の方が大きい、最大ねじり

強度で50℃、降伏点、弾性限で50～100℃と引張強度の場合と同じく Si-Cr 鋼の方が高温側にある。また、冷間引抜のままの値よりも降下するところは、ピアノ線で350℃の温度で得られるが、Si-Cr 鋼では実験範囲内で降下することはない。降伏比、弾性限比も同じことがいえ、上昇率には差がないが、上昇の始まる温度と最大上昇率の得られる温度が異なっている。

4.2.3 加熱ねじり特性

合金鋼の特長の1つに加熱時における耐へたり性の改善がある。そのため3.2mmの試料を用いて加熱ねじり試験を行ないその性能を確認した。

図9に加熱時のねじり特性を示すが、試料間に大きな

図9 加熱ねじり特性

差はみられない。最大ねじり強さは試料の強度に関係なく、加熱温度200℃まではあまり低下しないが、これを過ぎると急激に降下する。これに対し降伏点、弾性限は加熱温度とともに徐々に降下する。中でも弾性限の方がやや大きく、降伏比は400℃まで80%を維持するが、弾性限比は400℃で70%となる。また、剛性率はおおよそ200℃を越えると急激な降下があるが、200℃で約8200 kg/mm^2 である。

ここで、同鋼種の Si-Cr 鋼オイルテンパー線と比較すると図10のようになるが、両者の冷間引抜後、または、オイルテンパー後の強度が異なるため、これを降下率としてみると図11、図12になる。これらのグラフから最大ねじり強さはいずれの加熱温度においても、オイルテンパー線の方が優っているが、降伏点はその傾向がやや異なり、特に200～300℃の範囲では冷間引抜したものの方がすぐれている。しかし、300℃を越えてからの降下率

図10 加熱温度とねじり特性値の関係

図11 ねじり強度の加熱温度とその変化率
—Si-Cr 鋼オイルテンパー線との比較—

は冷間引抜材が降伏点、弾性限ともに大きくなる。降伏比の降下は 150℃ を越えると冷間引抜材の方が著しく少

図12 ねじり降伏点、弾性限の加熱温度による変化率
—Si-Cr 鋼オイルテンパー線との比較—

ない。また、冷間引抜材が降伏比と弾性限比との差が大きいのにに対し、オイルテンパー線ではその差が少なく、しかも、同じ降下傾向をもっている。

4.3 ばねによる特性

ばねの特性について剛性率、加熱締付などを試験したが、これらのデータについて他の各種鋼線と比較するため文献⁴⁾からのデータを引用した。なお、参考に比較材の引張強さと低温焼鈍条件について表10に示した。

表10 比較材の機械的性質

線径, 4.0mm

種 類	引 張 強 さ (kg/mm ²)	低温焼鈍
弁ばね用ピアノ線	165	350℃, 15min
弁ばね用炭素鋼オイルテンパー線	151	400℃, 15min
弁ばね用 Si-Cr鋼オイルテンパー線	189	400℃, 15min

4.3.1 ばねの剛性率

線の引張強さがばねの剛性率に影響するかどうかを 3.2 mm について行なった。3種のばねから荷重試験を行ない、荷重—たわみの関係からばね定数を求め、剛性率として表11に示した。これから試料間に差があるかどうかを分散分析により有意差検定を行なった結果、差のないことを認め総平均として 8184 kg/mm² を得た。この値は文献⁴⁾のピアノ線よりも僅かに低い、同鋼種のオイルテンパーしたものよりはるかに高い。

4.3.2 加熱締付試験

各種のばねにとって耐疲労性の優れていることのほかに、へたりの少ないことは欠くべからざる性質である。

表11 剛 性 率 (kg/mm²)

n	A	B	C
1	8337.9	8062.3	8177.1
2	8154.1	8062.3	8177.1
3	8269.0	8108.2	8246.0
4	8200.1	8314.9	8223.0
5	8131.2	8085.2	8223.0
平 均	8218.5	8126.6	8209.3
総平均	8184.0		

へたりは一般に引張強さ、弾性限などの高いことのほか、多くの因子により左右されるが、昇温状態では鋼固有の耐熱性が大きな因子となる。そこで、3.2 mm および 4.0 mm を用いての実験結果を示すと次のようになる。

(1) 3.2 mm の実験

3 種類のばねについて、各試験温度別に加熱締付時間と残留せん断ひずみの関係をみると図13、図14、図15のごとくなる。これらのグラフから3種のばねはいずれもおよそ10時間までに急激に残留せん断ひずみは上昇し、

図13 残留せん断ひずみと加熱締付時間の関係 (150°C)

それ以降はあまり変化せずに除々に上昇する。この状況を判りやすくするために 3.2 mm B, 応力 70 kg/mm² をとりだし、他鋼種⁴⁾と比較した結果を図16に示す。傾向としては各鋼線とも同じであるが、200~250°Cではピアノ線のみ残留せん断ひずみは時間とともに増加する。また、これらのグラフから64時間後の残留せん断ひずみについて温度別、応力別にまとめたものが図17、図18である。図17から温度による影響は実験の温度範囲では直線的に変化し、温度の高くなるほど残留せん断ひずみは大きくなる。また、供試材の種類間では線の引張強さにより大きく左右され、引張強さの高いものほど残留せん断ひずみは小さくなる。図18から締付応力が大きくなるほど、残留せん断ひずみは増加するが、各温度とも締付

応力 50 kg/mm² を越えると直線的に増加する。いずれも引張強さの大きい方が残留せん断ひずみが小さいのは、温度別にみた場合と同じで、冷間引拔後の最大ねじり強度に影響される。これらの値はピアノ線、炭素鋼オイルテンパー線より少なく、Si-Cr 鋼オイルテンパー線よりも大きい。同じように64時間後の残留せん断ひずみについて図19、図20に示す。図19から温度の影響を見ると冷間引拔 Si-Cr 鋼線は Si-Cr 鋼オイルテンパー線と炭素鋼オイルテンパー線のいずれの温度においても中間にある。しかし、ピアノ線は 150°C では炭素鋼オイルテンパー線とあまり変わらないが、この温度以上で著しく残留せん断ひずみが増加するのに対し、冷間引拔 Si-Cr 鋼線は Si-Cr 鋼オイルテンパー線に対し大きな差はない。図

図14 残留せん断ひずみと加熱締付時間の関係 (200°C)

図15 残留せん断ひずみと加熱締付時間の関係 (250°C)

図16 残留せん断ひずみと加熱締付時間の関係
(締付応力: 70 kg/mm²)

図17 残留せん断ひずみと締付温度の関係 (64時間後)

図18 残留せん断ひずみと締付応力の関係 (64時間後)

図19 加熱締付試験における加熱温度
と残留せん断ひずみの関係
(他鋼種との比較)

図20 加熱締付における締付応力と残留せん断ひずみの関係 (64時間後)

表12 比較材の化学成分(%)と機械的性質

(供試材4.0mmの比較材)

種 類	C	Mn	Cr	V	引張強さ(kg/mm ²)	絞り(%)	伸び(%)
弁ばね用ピアノ線	0.78	0.51	—	—	171	49	3.0
弁ばね用炭素鋼オイルテンパー線	0.70	0.72	—	—	154	51	8.0
弁ばね用 Cr-V 鋼オイルテンパー線	0.51	0.85	1.01	0.19	165	51	6.0

20から締付応力の影響をみると各温度とも応力に対し、ピアノ線、炭素鋼オイルテンパー線、冷間引抜 Si-Cr 鋼線、Si-Cr 鋼オイルテンパー線の順で残留せん断ひずみが大きくなっている。

(2) 4.0 mm の実験

さきに比較した鋼種のうち Cr-V 鋼オイルテンパー線の特徴がわからないため、4.0 mm の線について比較してみた。なお、ここで供試材 4.0 mm と比較した各鋼

種の化学成分と冷間引抜後、または、オイルテンパー後の機械的性質を表12に示す。このうち Cr-V 鋼オイルテンパー線と比較実験した加熱締付の結果を図21に示す。これから Si-Cr 鋼が Cr-V 鋼より著しい耐熱性を示しおおよそ $\frac{1}{2}$ である。

4.4 疲労試験

ばね鋼線として考慮するとき最も大切なものは、疲労限の高いものが得られるかということである。そこでわれわれは線のままとばねについて若干の試験を行なった。

4.4.1 線の疲労試験(シェンク式)

まず、供試材 5.0 mm の結果を図 22 に示す。これから低温焼鈍温度 380, 420°C では変らず疲労限は 50 ± 15 kg/mm² である。なお参考に 5.0 mm の低温焼鈍後の機械的性質を表13に示す。

また、3.2 mm B について低温焼鈍温度を3条件にかえたときの疲労限を文献⁴⁾の疲れ限度線図にプロットすると図23となり、低温焼鈍温度は 360°C が最もすぐれ、ピアノ線の疲労限をやや上廻り 50 ± 20 kg/mm² である。

図21 残留せん断ひずみと加熱締付時間の関係

表13 供試材 5.0 mmの機械的性質

低温焼鈍		380°C, 30min	420°C, 30min
機械的性質	引張強さ (kg/mm ²)	184.0	178.0
	降伏点 (kg/mm ²)	183.5	175.0
	降伏点比 (%)	99.5	98.2
	ヤング率 (kg/mm ²)	20,000	20,500
	伸び (%)	3.0	8.3
	絞り (%)	45.0	44.4
ねじり特性	最大ねじり強さ (kg/mm ²)	102.7	107.4
	降伏点 (kg/mm ²)	101.6	100.0
	降伏点比 (%)	99.0	93.0
	剛性率 (kg/mm ²)	8,200	8,100
	ねじり回数 (100d)	24	26

図22 供試材 5.0 mm S-N 曲線 (シエンク式)

図23 各種低温焼鈍材の疲れ限度と他鋼種の関係

4.4.2 ばねの疲労試験

(1) 常温疲労

供試材 3.2 mm の 3 種類のばねを用いて 360, 400, 420°C で低温焼鈍したときの疲労限を求めると図24のごとくなる。3.2 mm A である引張強さの低いもので、低温焼鈍温度 360°C と低いものが最も優れている。これら

図24 各種供試材の低温焼鈍温度と疲労限の関係
—ばね—

図25 低温焼鈍温度と疲労限 (他鋼種との比較)

図26 残留せん断ひずみと応力振幅の関係

を文献⁴⁾の疲れ限度線図上にプロットすると図25となる。これから他鋼種と比較すると、低温焼鈍温度により異なるが、ピアノ線の疲労限より低いのが炭素鋼オイルテ

ンパー線, Si-Cr 鋼オイルテンパー線とあまり変わらないことがわかる。しかし, 疲労限と同じく疲労試験後の残留せん断ひずみは無視できないため, 3.2 mm B をとりだし 2×10^6 後の変形量を文献⁴⁾と比較し図 26 に示す。本鋼種は低温焼鈍温度により異なり, 温度の高い 420°C では残留せん断ひずみは顕著である。420, 360°Cは大差なく, 応力振幅が大きくなると Si-Cr 鋼オイルテンパー線よりも残留せん断ひずみは大きくなるが, 応力振幅が小さいときは逆に小さい。これはピアノ線, 炭素鋼オイ

図27 ばねの S-N 曲線

ルテンパー線の場合と比較すると非常に小さい。

また, 350°C で30 分の低温焼鈍後, セッチングをした供試材 4.0 mm のばねについて平均応力をかえて S-N 曲線, 疲れ限度線図を求めると図27, 図28となる。

図28 ばねの疲れ限度線図

(2) 高温疲労

一般に高温疲労の場合, 疲労限よりもしばしばへたりの方が問題になることが多い。そのため 2×10^6 回後の残留せん断ひずみを求めた。

まず, 供試材 3.2 mm を用いた150°Cの場合の結果を

図29 高温ばね疲労試験における平均応力と残留せん断ひずみの関係 (150°C, $\tau_a = 25.2 \text{ kg/mm}^2$, $N = 2 \times 10^7$)

図29に示す。これから残留せん断ひずみは低温焼鈍温度の高い方が少なく、かつ、引張強さの高い方が少ないことが全般的にいえる。なお、参考に Si-Cr 鋼オイルテンパー線について文献⁴⁾ のデータを記載したが、回転数が 1400 r.p.m. のため正確な比較にならない。また、このグラフから $r=0.03\%$ を許容するときの平均応力を求めると表14となる。

表14 加熱温度 150°C における $r_{0.03}$ を許容する応力 (kg/mm²)

供試材	低温焼鈍温度 ×20min	360°C	400°C	420°C
3.2 mm A		65.0	70.0	57.5
3.2 mm B		68.5	69.0	62.0
3.2 mm C		70.0	65.5	66.0
Si-Cr 鋼オイルテンパー線		—	62.0	—

(注) Si-Cr 鋼オイルテンパー線は 1500 r.p.m

また、供試材 4.0 mm については Cr-V 鋼オイルテンパー線とあわせて 150~250°C で試験した。その結果を図30、図31に示す。これらから両者とも平均応力 60 kg/mm² をこえとほとんど直線的に残留せん断ひずみは増加することがわかる。また、温度の影響は直線関係にあるが、Cr-V 鋼オイルテンパー線は平均応力 80 kg/mm² で温度とともに急激に上昇する。これから $r=0.03\%$ を得る温度は締付応力 60 kg/mm² のとき Cr-V 鋼オイルテンパー線が約175°C、冷間引抜 Si-Cr 鋼線が約210°Cとなり、耐熱性は鋼種に關係して Si-Cr 鋼が著しく優れていることがわかる。

図30 高温ばね疲労における平均応力と残留せん断ひずみの関係
—Cr-V 鋼オイルテンパー線の比較—

図31 高温ばね疲労における加熱温度と残留せん断ひずみの関係
—Cr-V 鋼オイルテンパー線との比較—

(3) メッキしたばねの疲労

供試材 3.2 mm の中でも最もメッキの影響が顕著に表われると思われる引張強さの高い 3.2 mm C を用いて、電気亜鉛メッキしたままと、これをベーキング処理したばねの疲労試験結果を図32に示す。これは 1 例にすぎないので結論を導くことはできないが、今回の実験ではメッキによる脆化は全く認められない。

図32 電気亜鉛メッキの S-N 曲線への影響

(4) 引張ばねによる疲労

供試材 4.0 mm を用いて、常温と 130°C における $N=10^6$ 後の荷重減少量を求めると図33のごとくなり、他鋼種に比較して合金鋼の特性がよくあらわれており、顕著

図33 引張ばねの荷重減少量と平均応力の関係
—ピアノ線、炭素鋼オイルテンパー線との比較—

な差がある。なお、このときの折損はすべてフック部から起っているが、その状況をまとめると表15となり、大略冷間引抜鋼線がすぐれていることがわかる。

表15 引張ばねの折損状況 $n=3$

項目 試験条件	供試材	試験応力 τ_m (kg/mm ²)		
		60	80	100
常温 疲労試験	Si-Cr冷間引抜鋼線	0	0	1
	弁ばね用炭素鋼オイルテンパー線	0	1	2
	弁ばね用ピアノ線	0	0	1
加熱 疲労試験 (130°C)	Si-Cr冷間引抜鋼線	0	1	0
	弁ばね用ピアノ線	0	0	1
	弁ばね用炭素鋼オイルテンパー線	0	1	3

5. 考察

高引張強さ冷間引抜 Si-Cr ばね鋼線はステップ・パテンチングの開発により、ピアノ線のパテンチングと同じように熱処理後に微細パーライト組織が得られることにより製造可能となった。このステップ・パテンチングにより得られた熱処理後の電子顕微鏡写真の1例をピアノ

写真1 Si-Cr 鋼のステップ・パテンチング組織
×6000 (レプリカ)

写真2 ピアノ線の鉛パテンチング組織×6000
(レプリカ)

写真3 Si-Cr 鋼のステップ・パテンチング組織
×40000 (透過)

線のパテンチングと比較して写真1、2、3、および、4に示した。ここに示されたステップ・パテンチングでは、冷却速度の遅かったことに起因して初析フェライトの析出が認められる。しかし、微細パーライトの状態はピアノ線のそれと変わらないためすぐれた伸線能をもっていることが写真からうかがえる。ここで、われわれは合

写真4 ピアノ線の鉛パテンチング組織×40000
(透過)

金鋼の未変態組織についての懸念のため、ステップ・パテンチングせる試料を急速熱膨脹計を用いて異常熱膨脹を求めるべく測定したが、何らの異常が認められなかった。さらに、低温焼鈍により生ずるひずみ時効においてピアノ線に比較して引張強さ、および、ねじり強さの最大値とも約50°C高くなることを述べてきたが、この点に

写真5 冷間引抜後の Si-Cr 鋼 (低温焼鈍後)
×40000 (透過)

写真6 冷間引抜後のピアノ線 (低温焼鈍後)
×40000 (透過)

関して 300°C で低温焼鈍した試験について、電子顕微鏡を用いて何らかの析出物の確認を試みたが、写真5、および、6にみるごとくピアノ線と何ら変らず確認できなかった。

低温焼鈍により強度が50°C高い側に表われる原因として Si および Cr の影響をみる事ができる。すなわち、Si、Cr は置換型固溶体であり、伸線により生ずる転位の回復を遅らせるためであろう。他の実験²⁾ でわれわれは冷間引抜高炭素-シリコン鋼線においても同じようにこの問題を確認した。これに加えて Cr のように炭化物形成化の傾向をもつものでは、ひずみ時効によりわずかに高温側にずらすためと考える。

つぎの大きな特長として、一般に知られているようなピアノ線と異なり、降伏・弾性限比が顕著に高いことは、合金元素としての Si に固溶効果によるためである。

また、同鋼種でありながら冷間引抜した Si-Cr 鋼がオイルテンパーしたものより、加熱ねじり試験において特に降伏比の減少が少ないのは、冷間引抜鋼線が転位を固着する可溶な形の Intrinsic Substance、例えば、窒素、または、炭素がまだ残存しているが、オイルテンパー線ではすでにオイルテンパー処理により、窒化物、炭化物の形で析出され、したがってオイルテンパー線は転位の固着効果が少ないため軟化が起ると想像される。

最後に、本鋼種の特長である Si の添加により非金属介在物の増加が考えられるが、われわれの経験では厳格な管理のもとで製鋼される場合、(ばね材料としてみれば) 介在物の影響は現われないと信じている。

6. ま と め

冷間引抜 Si-Cr 鋼線についてまとめるとつぎのことがいえる。

(1) 既存鋼種である Si-Cr 鋼を用いて、ステップ・パテンチングによりピアノ線の場合と同じように微細パーライトを得ることができ、その強度もピアノ線に匹敵するものが得られる。

(2) ひずみ時効で強度の最大値はピアノ線より50°C高温側にある。

(3) ひずみ時効後の降伏比、弾性限比がピアノ線に比較して顕著に高く、引張特性でそれぞれ99%、92%、ねじり特性で99%、98%になる。

(4) 高温時の特性を同鋼種のオイルテンパー線と比較したとき、冷間引抜鋼線の降伏比は 250°C まであまり変化せず、オイルテンパー線よりも高い。

(5) Si-Cr 鋼オイルテンパー線の剛性率に比較して、

冷間引抜 Si-Cr 鋼線は高くなり、他のばね材料、すなわち、ピアノ線、炭素鋼オイルテンパー線と同じとみてよい。

(6) ばねの加熱締付試験によるへたりはピアノ線、炭素鋼オイルテンパー線、Cr-V 鋼オイルテンパー線より少ないが、同鋼種のオイルテンパー線より大きい。

(7) 常温ばね疲労において適当な低温焼鈍を行なえば、その疲労限はピアノ線よりやや劣るが、炭素鋼オイルテンパー線、Si-Cr 鋼オイルテンパー線と同程度である。しかし、へたりはピアノ線、炭素鋼オイルテンパー線、Cr-V 鋼オイルテンパー線に比較して著しく優れている。

(8) 高温ばね疲労によるへたりは、Si-Cr 鋼オイルテンパー線との差は明確でないが、Cr-V 鋼オイルテンパー線より少ない。

(9) 引張ばねなどのフック加工も容易で疲労試験におけるフック部の折損も少ない。

(10) メッキ処理の影響はピアノ線と変わらないと考えてよい。

以上の資料は本会主催の創立20周年記念講演会において当社が発表したもの⁵⁾と、昭和43年度秋季講演会において村田発条株式会社と共同発表したもの⁶⁾、および、

The Wire Association 主催の the 38 th Annual Convention で発表⁷⁾したものをまとめたものである。

本研究遂行にあたって、終始有益な御助言をいただき、同時に、電子顕微鏡撮影に御協力いただいた八幡製鉄株式会社東京研究所に厚く感謝の意を表します。

文 献

- 1) ステップ・パテンチング：特許出願中
- 2) 本田，花島：PCI Convention, 1968, Oct, 8発表 (U. S. A), および和光，鈴木，岸上，小森：プレストレスト・コンクリート技術協会，第9回演会 (1968) 投稿中
- 3) 岡本，江口，富永：鉄と鋼，50 (1964)，128
- 4) ばね技術研究会：ばね論文集 (自動車用弁ばねの耐久性能に関する共同研究特集)
- 5) 鈴木，井上，小泉：本会創立20周年記念講演会，前刷集，1968，1
- 6) 内藤，長久保，石栗：本会43年度秋季講演会，前刷集，1968，13
- 7) 本田，井上：The Wire Association Convention 1968, Oct, 23発表 (U. S. A)