ショットピーニングの最適化に関する研究委員会報告*

ショットピーニングの最適化に関する研究委員会

Report of Research Committee for Optimizing a Shot-Peening Process

Research Committee for Optimizing a Shot-Peening Process

In the first half of 1980s, The Japan Society for Spring Research held the joint committee which researches shot-peening condition for small springs. This committee proposed optimum shot-peening conditions for steel grades and wire diameters. Recent years, strength of spring material has been targeted to be higher and higher levels. Shot-peening technology has been improving, and new shot-media and multi-shot-peening technology have become to be employed. Therefore, the joint research was needed for high strength spring. Under these circumstances, a research committee for optimizing a shot-peening process was established in September 1996. In this committee, the experimental shot-peening conditions were widely chosen in the possible range of manufacturing parameter. Single shot-peening, double shot-peening, stress shot-peening and hardness of spring were studied. The effect of each shot-peening process on fatigue strength were considered in relation to surface compression stress and surface roughness. For control of shot-peening condition, effectiveness of a harder Almen strip, relation between X-ray radiation field size and wire diameter, and the correction method of residual stress were studied.

The results are summarized as follows.

- (1) For high strength spring, a harder Almen Strip with hardness of 58HRC, thickness 1.3mm, is proposed.
- (2) Research on suitable shot-peening conditions for high strength spring :
 - (a) The difference of torsional and rotary fatigue test is negligible.
 - (b) In the case of single shot-peening, higher surface residual stress and smaller surface roughness induced high strength of fatigue
 - (c) In the case of double shot-peening, harder and finer shot indicated higher strength of fatigue.
 - (d) Stress shot-peening could not be better than double shot-peening with higher and finer shot.
 - (e) Double shot-peening with higher and finer shot indicated the best fatigue strength.
- (3) Analysis of fatigue phenomenon for a shot-peened spring
 - (a) Compression residual stress on surface is the most effective for improving fatigue strength.
 - (b) Stage I type crack first initiates and propagates and then stage I crack transfers into stage II type crack. Magnitude of stage I crack is almost equal to depth of compression residual stress.
- (4) X-ray stress measurement :
 - (a) In the case of coil spring, X-ray radiation field size should be smaller than $1/2 \sim 1/3$ of wire diameter.
 - (b) By using FEM method, Heyn's correction equation is practically useful for correction of residual stress.

Key Words : Spring, Spring steel, Shot-peening, Fatigue strength, Residual stress, Roughness, Hardness, Arc-height, Almen strip, X-ray stress measurement.

1. はじめに

ばねの疲労強度向上のために、ショットピーニング処理（以下SPと記す）は決定的に重要な役割を担ってきた。ばね技術研究会では、1980年代前半に小物ばねを対象にSPに関する共同研究を行い、鋼種別、線径別に対応する適正加工条件の概略を明らかにしている¹⁾。しかし近年、ばね材料は年々高強度化してきているとともに、SP技術も新しいショット材料や多段SPの採用など進歩してきている。

このような状況のもとに、新技術調査委員会から、新たにSPに関する共同研究の必要性が指摘され、[SPの諸問題に関する準備委員会]が1995年に発足した。準備委員会では、ばねに対するSPの現状での問題点が抽出、集約され、その解決を図るため新たな共同研究の計画骨子が検討、提案された²⁾。

本研究委員会は、準備委員会の提案を受け、標記の委員構成のもとに、1996年9月より活動を開始した。

委員長 丹下 彰（日本発条）

副委員長 竹田 仁（新東工業）伊澤 佳伸（東郷製作所）

委員 茨木 伸彦（神戸製鋼）小木曾克彦（理学電機）

金澤 健二（中央大学）栗原 義昭（三菱製鋼）

小倉 潤司（三菱製鋼）榊原 隆之（中央発條）

鈴木 章一（鈴木金属）孫 維国（サンコール）

当舍 勝次（明治大学）原田 泰典（豊橋技大）

福田 博文（村田発条）村井 照幸（住友電工）

村田 雄三（大同特殊鋼）山本 秀夫（日本発条）

吉原 直（神戸製鋼）米口 明雄（日本発条）

渡邊 吉弘（東洋精鋼）

大野 明（ばね技術研究会顧問）

（背景）

ある引張強さの材料のばねにSP加工を施すことで、ばねの表面に圧縮残留応力場の生成と表面近傍の硬さの増加そして表面粗さの増加が同時に生じる。ばねの疲労強度は、材料の引張強さに加え、残留応力、表面近傍硬さそして表面粗さの影響を受ける。SP加工条件と残留応力および表面粗さの関係について、規格³⁾や指針⁴⁾、そして多くの解説書⁵⁾などがあるが、定量的に関係づけるものではない。残留応力と表面粗さの疲労強度に及ぼす影響については、これまでにばね技術研究会での研究も多くあるが、限定された条件での残留応力と疲労特性の関係に関するものが大半で、汎用性のある報告は少ない。また近年のばねの強度レベルを対象としていない。最近では、残留応力と表面粗さの両方を考慮した設計指針として、破壊力学的手法を用いた研究がある^{6) 7)}。しかし、ねじり疲労に対しては検討されていない。さらに、準備委員会においてSP加工条件の管理に関する問題点が多く指摘されている。これは特に近年、ばねの硬さがアルメンストリップの硬さを上回っていることの

矛盾に係わるものである。アークハイトと疲労強度との関係について十分知られていないこともSP管理を不明確なものにしていると考えられる。また、残留応力の測定法についても、依然として検討の余地が残されている。

（目的）

そこで、本研究委員会は、高強度ばねのSPに関連し、以下の課題に取り組むことを目的に活動を開始した。

- (1) 高強度材のSP条件を管理するためのアルメンストリップの提案
- (2) 高強度材に最適なSP条件の検討
- (3) SP材の疲労現象の解明
- (4) ばねの残留応力測定方法のガイド作成とSPによる残留応力補正に関するシミュレーション
- (5) SP関連システムのフレーム構築

2. 高強度アルメンストリップの開発

2.1 目的

ばねの疲労強度向上のために、ばね材料も高強度のものが使用されるようになってきた。それに応じ、SP加工の投射材も高硬度のものが主流となり、投射速度も高速化してきた。しかし、この強いSP条件のもとでは、従来の標準アルメンストリップは、投射速度、ショット粒径、ショット硬さそして投射時間によるアークハイトの変化が小さく、SP条件の高精度な管理という面で支障をきたしてきた。さらに、標準アルメンストリップでは横方向の変形が無視できなくなる問題も指摘されている。そこで、高強度ばね材のSP条件を管理するための新たなアルメンストリップ（以下高強度アルメンストリップと呼ぶ）の開発が待たれるようになった。本共同研究では、高強度アルメンストリップの硬さ、板厚そしてSP時でのアルメンストリップの保持方法について研究した。

2.2 供試アルメンストリップの諸元

供試したアルメンストリップの化学組成を表2-1に示す。供試材は入手性を考慮して油焼入用炭素工具鋼SKS95相当材を選択した。なお、標準アルメンストリップ用材料はSK5であり、両者の違いはMn量である。供試材の大きさは標準と同じ、長さ76 (±0.4)mm、板幅19.0 (+0, -0.1)mm、板厚0.8, 1.3, 2.4mm、硬さは48, 58HRCとした（表2-2）。

2.3 SP条件

SP加工は実用性のある範囲でもっとも弱い条件から強い条件までを行うこととした。そのため、投射材は、角をラウンド化したコンディションドカットワイヤ（以下CCW、材質：SWRH）で、粒径φ0.3, 0.6mm、硬さ550, 700HVのものをを用いた。投射速度は40, 60, 80m/sとした。投射量は90kg/min一定とした。また、投射時間は10, 20, 40sとした。したがって、組合せは2×2×3×3=36通りとなる。表2-3に投射条件を示す。すなわち、もっとも弱いSP条件は、

Table 2-1 Chemical composition of Almen strips (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SK5 (標準)	0.8~0.9	≤0.35	≤0.5	≤0.03	≤0.03	≤0.25	≤0.25	≤0.3
SKS95 (供試材)	0.8~0.9	≤0.35	0.8~0.9	≤0.03	≤0.03	≤0.25	≤0.25	0.2~0.6

Table 2-2 Conditions of Almen strips

呼称	供試アルメンストリップ	
標準A片	1.3mm厚さ	硬さ 48HRC
供試材	N片	0.8mm厚さ
	A片	1.3mm厚さ
	C片	2.4mm厚さ
	NS片	0.8mm厚さ
	AS片	1.3mm厚さ
	CS片	2.4mm厚さ
		硬さ 58HRC (650HV)

Table 2-3 Conditions of shot peening processes

投射材粒径 (mm)	投射材硬さ (HV)	投射量 (kg/min)	投射時間 (sec)	投射速度 (m/sec)
φ0.3, φ0.6	550HV, 700HV	90	10, 20, 40	40, 60, 80

Fig.2-1 A sketch of SP apparatus

粒径φ0.3mm, 硬さ550HV, 投射速度40m/s, 時間10secである。一方, 最も強いSP条件は粒径φ0.6mm, 硬さ700HV, 投射速度80m/s, 時間40secである。

2.4 SP加工装置とアルメンストリップ保持方法

実験に用いたSP加工装置は遠心投射式で, インペラー外径がφ360mmのものである。インペラーと供試材アルメンストリップとの位置関係を図2-1に示す。

供試材のアルメンストリップは保持具にセットされ, インペラーの回転中心直下500mm, 回転前方138mmの位置に水平に置かれた。この位置は, アルメンストリップにショットがほぼ直角に投射される位置に対応している。供試材は, 保持具上に拘束ありとなしの両方法で保持した。拘束ありは供試材を保持具上に4本のボルトで固定する, 標準の取付方法である。拘束なしは, 図2-2に示すように, 保持具上で6ヶの金具を用いてアルメンストリップがSP中に自由に

Fig.2-2 Set of Almen strips without restrictions

Fig.2-3 Relationship between arc height of Almen strips(restricted) and peening time (Hardness of shots 550HV, φ0.6)

変形できる状態とした取り付け方法である。同図から板厚が0.8, 1.3そして2.3mmの供試材アルメンストリップは長手端部を4mmの上下隙間を有する金具にはめ込まれる。また, 供試材アルメンストリップの横方向の動きを拘束しないように, 6ヶの金具はアルメンストリップとの隙間を1.5~2mm設けている。

ここで, アルメンストリップの保持方法として拘束なしを検討したのは, 次の理由による。標準のボルト固定方式はSP中にアルメンストリップの変形を拘束することになっているため, 本来のアークハイトを示していないものと考えられる。そこで, ショットピーニング中にアルメンストリップが保持具から弾き飛ばされない程度でかつアルメンストリップと保持具の間にショットが入り込まないことに配慮して, 図2-2の6ヶの金具を有する保持具を製作した。

2.5 実験結果と考察

(1) アークハイトへ及ぼすアルメンストリップの硬さと板厚および固定方法の影響

(a) アルメンストリップの硬さとアークハイトの関係を図2-3に示す。硬さの低い48HRCのほうが硬い58HRCより同一SP条件でのアークハイトの値は大きい。また, アークハイトの値は本実験の範囲においては, ほぼ投射時間に比例している。

(b) アルメンストリップの板厚とアークハイトの関係を図2-4に示す。板厚のアークハイトへの影響は大きく, 板厚の増加とともにアークハイトは小さくなる。次に, 各板厚でのアークハイトへ及ぼす硬さの影響を

Fig.2-4 Relationship between thickness of Almen strips (restricted) and arc height (Hardness of shots 700HV, ϕ 0.3)

Fig.2-5 Relationship between strips (restricted or unrestricted) and arc height (Hardness of shots 770HV, ϕ 0.3, Hardness of Almen strips, 48HRC)

詳細にしらべると、板厚1.3mmの条件は同一速度条件で、48HRCのアルメンストリップのアーカハイトが58HRCのそれより大きく妥当な結果となっている。しかし厚さが2.4mmとなると、アルメンストリップ硬さが48HRCと58HRCとではアーカハイトの差が認められなくなる。また、厚さが0.8mmの条件では、アーカハイトの硬さ依存性にバラツキが大きい。例えば、80m/sの条件では48HRCのアーカハイトが58HRCのそれより大きく、妥当性がある。しかし、60m/sおよび40m/sの条件では硬さの差によるアーカハイトの影響がほとんど認められない。したがって、板厚は1.3mmが高強度アルメンストリップとして適している。

(c) アルメンストリップの固定方法のアーカハイトへの影響を図2-5に示す。「拘束なし」のほうが「拘束あり」に比べてアーカハイトの感度が明らかに大きいことがわかる。

(2) 高強度アルメンストリップ条件の決定

アーカハイトへ及ぼすアルメンストリップの硬さ、板厚そして拘束方法の影響を示した。しかし、これらのアー

Table 2-4 Relationship between conditions of shot peening and arc height

現状	全領域	A片	N片	CS片	データ	データ	データ	データ
					最大値	最小値	データ数	
					0.800	0.120	36	
					0.943	0.545	28	
					0.915	0.800	31	
					0.725	2.080	36	
					0.893	0.805	36	
					0.920	0.805	31	
					0.949	0.805	20	
					0.940	0.585	28	
					0.809	1.950	36	
					0.930	1.950	24	
					0.933	0.170	36	
					0.896	1.275	36	
					0.862	0.605	36	
					0.904	0.605	29	
					0.959	0.805	21	
					0.841	0.930	36	
					0.951	0.930	19	
					0.919	0.170	36	

クハイトへの影響は複雑で、高強度アルメンストリップとしての硬さや板厚そして拘束方法は容易に決定できない。そこで、硬さ違い、板厚違いのアルメンストリップ毎のアーカハイトへ及ぼすSP条件すなわち投射速度、ショット粒径、ショット硬さそして投射時間の重回帰分析を行った。次に、各解析結果のSP条件の標準偏回帰係数と寄与率を標準アルメンストリップA片でのそれと比較した。逆説的ではあるが、寄与率の大きいアルメンストリップほど広範囲なSP条件の変化に対応して信頼性の高いアーカハイトの変化を示すことになる。すなわち、標準アルメンストリップA片より大きな寄与率を示す供試材アルメンストリップは高強度アルメンストリップの候補となり得ると考えた。

(a) SP条件とアーカハイト

SP条件を変数として、アーカハイトを重回帰分析で数式化し各変数の標準偏回帰係数を、SP条件のアーカハイトに及ぼす影響度合いを示すパラメータとして、各供試アルメンストリップについて調べた(表2-4)。回帰式を式(1)に示す。

$$\begin{aligned} \text{アーカハイト} = & a_0 \times \text{投射速度} + a_1 \times \text{ショット粒径} + a_2 \\ & \times \text{ショット硬さ} \\ & + a_3 \times \text{投射時間} + a_4 \end{aligned} \quad (1)$$

この結果、従来の標準A片の寄与率は0.943であることがわかる。この値よりも大きな値を示す供試材の条件は、次の3種類である。

- ①板厚1.3mm, 硬さ48HRC, 拘束ありの供試材寄与率0.949で標準A片に近い。
- ②板厚1.3mm, 硬さ58HRC, 拘束ありの供試材寄与率0.959で、投射材硬さ変化の影響度合いが標準と比較して高くなっている。
- ③板厚1.3mm, 硬さ58HRC, 拘束なしの供試材寄与率0.951で、投射材硬さ変化ばかりでなく、投射時間変化の影響度合いも他に比べると高くなっている。

(b) 横方向の変形

Fig.2-6 Relationship of arc height and distortion of width of Almen strips

Fig.2-7 Relationship between peening time and distortion of width of Almen strips without restriction (thickness 1.3mm, hardness 58HRC)

標準アルメンストリップの問題点の一つに、横方向の変形がある。標準アルメンストリップA片の、アークハイト許容規定値0.6mmAでの横方向の変形（短辺方向中央の最大曲がり高さ）を測定し500 μ mを得た（図2-6）。この値をアルメンストリップの横方向の変形許容値とし、供試材選定基準の一つに加えた。この基準を基に上記選択した3種を検討し次の供試材を選択した。

①板厚1.3mm, 硬さ58HRC, 拘束ありの供試材

標準アルメンストリップA片で600 μ mの横方向の変形が同一SP条件で210 μ mになり横方向の変形の問題は解消されている（図2-7）。

②板厚1.3mm, 硬さ58HRC, 拘束なしの供試材

標準アルメンストリップA片で600 μ mの横方向の変形が、同一SP条件で50 μ m以下になり横方向の変形の問題は全くないといえる（図2-7）。

さらに選択した供試材のアークハイトが、投射時間の増加とともに、横方向の変形の増加でアークハイトそのものが増加しなくなる傾向が、他の供試材と比較して改善されているかを確認した（図2-8）。板厚1.3mm, 硬さ58HRC, 拘束ありの供試材は、投射時間とともに増加はしているが、増加率は時間とともに小さくなっている。このためアークハイト値の測定は従来のアナログ式から、ミクロン単位で計測できるデジタル式への変更を考える必要がある。

Fig.2-8 Relationship between peening time arc height of Almen strips

2.6 高硬度アルメンストリップの提案

- 高強度ばねのSP条件を管理する観点では、板厚1.3mm, 硬さ58HRCの高硬度アルメンストリップが標準アルメンストリップと比較して、また他の供試材と比較してもより優れていることが確認された。
- 高強度ばね材のSP条件を管理するアルメンストリップとして板厚1.3mm, 硬さ58HRC, の高硬度アルメンストリップを提案する。また、合わせて、アークハイト値の測定には、デジタル式の採用を提案する。
- 今回の検討で拘束なしも優位にあるが、取付方向に限定があるため、拘束ありなしについては現場の使い易さ等を考慮にいれ、さらに詰めればよいと考えられる

3. 高強度材に対する最適SP条件の研究

3.1 目的

ショットピーニング（以下SPと記す）では、疲労強度向上に寄与する表面圧縮残留応力と表面硬さの向上そして弊害となる表面粗さの増加が同時に生じる。そこで、疲労強度向上のために、表面残留応力や表面粗さに影響するSP加工条件の選択が重要となる。従来、この問題に関する報告は多いものの、各報告は限定されたSP条件が多く、各報告間の整合性は必ずしも十分ではない。さらに、疲労試験の種類として、ばねを用いた疲労試験及び回転曲げ疲労試験が大半であるが、SP条件と疲労強度の関係が両者で一致していないのではないか、との指摘もある。

そこで、高強度材を用いたばねに対する最適SP条件を研究するために、以下のことに留意した。

- SP条件としての、ショットサイズ、ショット硬さ、投射スピードの選択は工業的に利用可能な範囲で広範囲なものとする。
- SPのかけ方は極力再現性のあるものとする。
- 疲労におよぼす要因として表面残留応力と表面粗さに注目する。
- シングルSPのみならず、より進化したSP条件として、ダブルSP及びブストレスSPの疲労強度へ及ぼす影響を調べる。

Table 3-1 Size of specimens for fatigue test and their manufacturing processes

試験片	形状・寸法	製造工程
弁ねじ	線径=4.0mm, 有効長さ=22.8mm, ねじ=φ4.5mm, 有効長さ=4.5, ねじ公差=47N/mm, ねじ角=8.6	ばね成形→1 焼入れ: 425℃×25min. →SP 焼入れ→2 焼入れ: 225℃×20min. →tensile: 1430MPa→疲労試験
中村式回転曲げ	線径=4.0mm, 全長=500mm, 変位点間=150mm	焼入れ→1 焼入れ: 425℃×25min. →SP 焼入れ→2 焼入れ: 225℃×20min. →疲労試験
ねじり	つかみ部直径=10mm, 最小断面直径=4mm, 最小断面部の曲率半径=20mm, 形状係数(Kt)=1.17	φ11.0×3mm 鋼材→試験片加工→焼入れ(ワット)→1 焼入れ: 425℃×25min. →SP 焼入れ→セッチング→2 焼入れ: 225℃×20min. →疲労試験
片持ち式回転曲げ	つかみ部直径=10mm, 最小断面直径=4mm, 最小断面部の曲率半径=20mm, 形状係数(Kt)=1.17	セッチングなし

Table 3-2 Condition of shot

ショット種類	ショットサイズ [*] (mm)	ショット硬さ(HV)	ショット硬さ実測値(HV)
CCW	0.3	550	522
	0.3	700	680
	0.6	550	521
	0.6	700	750
SS	0.1	840	820

Table 3-3 Peening time for coverage of 300% on each specimens

ショットサイズ [*] (mm)	ショット硬さ(HV)	投射速度(m/s)	投射時間, 秒		
			弁ねじ ^{**}	中村式回転曲げ	ねじりと片持ち回転曲げ
φ 0.3	550	40	90+90	150	105
		80	60+60	60	45
	700	40	75+75	135	75
		80	45+45	60	30
φ 0.6	550	40	210+210	360	210
		80	105+105	240	90
	700	40	150+150	330	180
		80	60+60	150	60

*1 反転を含む時間

⑤材料硬さの疲労強度への影響も調べる。

⑥疲労試験はばね以外に線材回転曲げおよび削り出しのねじりと回転曲げ試験を行い、試験法と疲労強度の差異を調べる。

3.2 実験方法

(a) 供試材料

試験に用いた材料はSUP12相当材であり, 化学組成(wt/%)はC:0.63, Si:1.46, Mn:0.65, Cr:0.72, P:0.012, S:0.008である。ばねと中村式回転曲げ疲労試験には, この材料を引張強さ2021MPa, 絞り50.6%とした線径φ4のOTWを用いた。OTWの製造工程はφ8のAs Roll材からφ4まで皮削り伸線した後, 高周波誘導加熱により, 880℃から油焼入れ, 焼戻し温度を425℃としている。材料の非金属介在物の清浄度は, JSMA No.13に準拠して10視野を測定した結果, P=2.4であった。これは, 弁ねじ用の高純度銅としては, 一般的なレベルであり, 特に非金属介在物の多い材料ではない。また, ねじり及び片持ち回転曲げ疲労試験用の試験片は, 線材圧延過程でのφ11の線材を用い, 試験片形状に削り出した後, 焼入れ・焼戻しによってOTW処理のものと同強度となるように作製した。

(b) 疲労試験片形状寸法及び加工方法

Photo. 3-1 Photograph of shots

疲労試験片の形状寸法と加工方法を表3-1に示す。各試験片の加工方法は, ばねの一般的製造工程すなわちコイリング後の1次テンパー, SP, セッチングそして2次テンパーを行なうものとした。ただし, セッチングはばね及びねじり試験片のみについて行った。

(c) 投射材

投射材として, 表3-2, 写真3-1に示した, コンディションドカットワイヤー (CCW) とスチールショット (SS) の2種類を用いた。

(d) SP条件

(d-1) シングルSP法

疲労強度向上のためには, 特に表面の圧縮残留応力を高めることと, 表面粗さを低下させることが効果的であると指摘されている。そこで, これらの影響を明確にするため, 表面残留応力と表面粗さの大, 小となるSP条件をショットサイズ, ショット硬さそして投射速度を変化させることで実現することとした。このSP条件の選択は, 表3-3に示すように, ショットサイズをφ0.3mmとφ0.6mm, 硬さを550HVと700HVさらに投射速度を40m/sと80m/sとなる8条件の組合せの中から行った。また, 試験片有効部にショットがほぼ垂直に投射されるように, インペラーと試験片の位置を調整した。試験片は, 全周に均等にショットが当たるように自転させた。片持ちとねじり試験片は1本ずつピーニングを行ったが, 中村式回転曲げとばねは治具を用い8本同時に処理した。したがって, ショットの当たり方は片持ち(ね

Table 3-4 Relationship between maximum surface roughness (μm) and maximum residual stress of surface (MPa)

○: max. for residual compression stress
min. for surface roughness
×: min. for residual compression stress
max. for surface roughness

SP条件		片持ち回転曲げ		ねじり		中村式回転曲げ		ばね		記号
ショット	投射速度	最大表面粗さ	表面残留応力	最大表面粗さ	表面残留応力	最大表面粗さ	表面残留応力	最大表面粗さ	表面残留応力	
φ 0.3	40m/s	○6.1	-700	○6.1	-570	○4.4	-569	○3.4	-750	C
550HV	80m/s	7.7	-620	7.7	-600	6.8	-569	8.7	-610	
φ 0.3	40m/s	12.1	○-875	12.1	-620	7.7	○-657	7.6	○-830	B
700HV	80m/s	20.8	-690	20.8	-550	12.9	-588	13.0	-690	
φ 0.6	40m/s	9.4	-740	9.4	-510	6.7	-549	5.5	-670	
550HV	80m/s	12.8	×-600	12.8	×-430	12.5	×-441	18.7	-630	A
φ 0.6	40m/s	21.5	-750	21.5	○-750	13.0	-637	11.7	-760	
700HV	80m/s	×42.3	×-600	×42.3	-510	×25.2	-539	×22.6	×-560	D

Table 3-5 Selecting the condition of double peening for deep crossing point

	1 段目	2 段目
サイズ	$\phi 0.6\text{mm}$	$\phi 0.3\text{mm}$
種類	CCW	CCW
硬さ	700HV	700HV
方式	遠心投射式	遠心投射式
速度	80m/s	40m/s
時間	60s×2 方向	75s×2 方向
投射量	90kg/min	90kg/min
—	0.38mmA	0.105mmA
—	300%	300%

じりも同じ)と中村式及びばねでは異なったものとなっている。またカバレッジは、ショットの当たり方が試験片で異なること及びSP条件の違いからショットによる圧痕の大きさが異なるため、実験の安定性に配慮して300%とした。その結果、投射時間は表3-3に示すように、試験片毎に異なったものとなっている。

表3-4に各試験片に8条件のSPを行った場合の表面粗さと表面残留応力の測定結果を示す。いずれの試験片においても表面粗さはショットサイズが大きいほど、ショット硬さが高いほどそしてショット速度が大きいほど大きくなる。この結果から表面粗さ最大の条件はショットサイズ $\phi 0.6\text{mm}$ 、ショット硬さ700HVそして投射速度80m/sであり、表面粗さ最小の条件はショットサイズ $\phi 0.3\text{mm}$ 、ショット硬さ550HVそして投射速度40m/sの条件であることがわかる。一方、表面残留応力の最大と最小のSP条件は試験片の種類によって若干異なっている。しかし、残留応力最大の条件はねじり試験片を除きショットサイズの小さい $\phi 0.3\text{mm}$ でショット硬さ700HV、投射速度が40m/sの条件となっている。また、表面残留応力が最小の条件は、ショットサイズが $\phi 0.6\text{mm}$ で投射速度が80m/sの条件となっている。またショット硬さの影響については550HVと700HVとで明瞭な差は認められていない。しかし、700HVの条件は表面粗さ最大条件でもあるため、ここでは、表面残留応力最小の条件としてショット $\phi 0.6\text{mm}$ 、硬さ550HVそして投射速度80m/sとした。以下に各試験条件をまとめ、以後使用する識別記号を示す。

A. 表面残留応力最小条件

(ショットサイズ $\phi 0.6\text{mm}$ 、ショット硬さ550HV、

Table 3-6 Selecting the condition of double peening for deep crossing point

	表面残留応力 MPa	最大表面粗さ μm
1 段のみ	-650	23
40m/s	-770	19
60m/s	-710	15
80m/s	-690	13

Table 3-7 Selecting the condition of double peening by very small shots with high hardness

	1 段目	2 段目	2 段目
サイズ	$\phi 0.3\text{mm}$	$\phi 0.1\text{mm}$	—
種類	CCW	SS	—
硬さ	700HV	840HV	—
方式	遠心投射式	遠心投射式	エアークロス式 直圧式
速度	40m/s	40m/s	80m/s
時間	75s×2 方向	60s×2 方向	10min (電によるパッチ式)
投射量	90kg/min	90kg/min	7.2kg/min
アーケハイト	—	0.110N	0.145N
カバレッジ	—	300%	300%

投射速度80m/s)

B. 表面残留応力最大条件

(ショットサイズ $\phi 0.3\text{mm}$ 、ショット硬さ700HV、
投射速度40m/s)

C. 表面粗さ最小条件

(ショットサイズ $\phi 0.3\text{mm}$ 、ショット硬さ550HV、
投射速度40m/s)

D. 表面粗さ最大条件

(ショットサイズ $\phi 0.6\text{mm}$ 、ショット硬さ700HV、
投射速度80m/s)

(d-2) ダブルSP法

ダブルSP条件は残留応力がゼロとなる深さ(クロッシングポイント)の大きい条件と高硬度微細ショットによる表面残留応力を高める条件について行った。

(i) クロッシングポイントの深いダブルSP

クロッシングポイントが深く、表面値・最大値の高い残留応力の付与を目的としてSP条件を選定した。1段目のSP条件は、シングルSPで、最もクロッシングポイントが大きいSP条件($\phi 0.6\text{mm}$ CCW 700HV 80m/s)とした。2段目のSP条件は、最も表面値が高い値の得られた投射材($\phi 0.3\text{mm}$ CCW 700HV)を選定し、投射速度の最適化を表3-5の範囲で検討した。測定された表面残留応力と表面粗さの値を表3-6にまとめる。この結果から2段目の投射速度として、表面残留応力値が最も高い40m/sを選んだ。

(ii) 高硬度・微細ショット粒により、表面残留応力値の向上を目的としたダブルSP

1段目のSP条件はシングルSPで、最も表面値の高い投射条件($\phi 0.3\text{mm}$ CCW 700HV 40m/s)とした。2段目のSP条件は、さらに表面値を高めるため、高硬度で微細なショット粒として投射材($\phi 0.1\text{mm}$ SS 840HV)を用い、遠心投射式とエアークロス式の両方でSPを行なうこととした。最適SP条件は表3-7に示す条件範囲で決定した。エアークロス式では、籠の中にばねを入れ、パッチ処理によりSP処理した。

Table 3-8 Selecting the condition of double peening by very small shots with high hardness

	表面残留応力	最大表面粗さ
	MPa	μm
1段のみ	-740	3.9
40m/s	-730	4
60m/s	-770	3.3
80m/s	-710	4.1
0.1MPa	-750	4.5
0.3MPa	-650	7.7
0.45MPa	-690	7.5

Table 3-9 Selecting the condition of stress peening

投射材	サイズ 種類	1段目	2段目	2段目
		$\phi 0.3\text{mm}$ CCW	$\phi 0.1\text{mm}$ SS	←
投射条件	硬さ	700HV	840HV	←
	方式	遠心投射式	遠心投射式	エアークロス 直圧式
	速度	40m/s	40m/s 60m/s 80m/s	0.1MPa 0.3MPa 0.45MPa
	時間	75×2方向	60×2方向	10min (電によるパッチ式)
アーケハイト カバレッジ	投射量	90kg/min	90kg/min	7.2kg/min 12.6kg/min 16.2kg/min
	—	—	0.110N 0.145N 0.180N 0.165N 0.295N 0.300N	—
—	—	300%	300%	300%

Table 3-10 Residual stress of surface after stress peening

	表面残留応力 (MPa)
1段のみ	-600
0.3MPa	-900
0.4MPa	-810
0.5MPa	-880

高硬度・微細ショット粒によるダブルSPの表面残留応力と表面粗さの値を表3-8に示す。同表から表面残留応力値が最も高く、表面粗さの値の小さい条件から、投射方式として遠心式を選択し、投射速度として60m/sが選定された。エアークロス式では、1段目処理品と比較し、高圧力側の条件で、むしろ表面残留応力の低下と表面粗さの悪化が見られた。

(d-3) ストレスSP法

ストレスSP法は、ダブルSP法よりもクロッシングポイントが大きく、表面値、最大値の高い残留応力の付与が期待される。この方法は治具によってばねの両座面を圧縮し、ばねにストレスを加えつつSPを行う方法である。したがって、ばね座付近は治具で覆われる関係から、ストレスSP処理時では座面がSPされない欠点がある。そこで、ストレスSPの前に通常のSPを行う必要がある。今回の実験では、通常のSPとして（すなわち1段目）、すでに選定した条件のうちで、最もクロッシングポイントが大きい投射条件（ $\phi 0.6\text{mm}$ CCW 700HV 80m/s）を用いた。その後のストレスSP（すなわち2段目）は、最も表面値が高い値の得られた投射材（ $\phi 0.3\text{mm}$ CCW 700HV）を用い加工条件を調査した。投射方法は、ばねの大きさの制限から、エアークロスとし、治具固定したばねのコイル内側の作用応力の最も高い部分に、エアークロスによる狙い打ちを行なった。締付応力は、投射材の通り抜けを考慮して設定した。

投射圧力の最適化を、表3-9の範囲で検討した。

Fig. 3-1 Distribution of residual stress of coil springs after single peening (principal stress direction)

Fig. 3-2 Surface roughness of inside of coil springs after single [Ry, Rz (μm)]

ストレスSP処理を行なったばねの、残留応力の表面値を表3-10に示す。2段目の投射圧力として、表面値が最も高い0.3MPaを選んだ。

3.3 試験結果と考察

3.3.1 ばねの疲労試験結果

(a) シングルSP法

図3-1に残留応力分布を示す。表面残留応力値はショットサイズが小さい方が高く、またショット硬さが高い方が大きい。クロッシングポイントはショットサイズが大きいほど、また硬さが大きいほど大きいことがわかる。したがって、表面残留応力値は、高い方から、 $B > C > A > D$ である。

図3-2に表面粗さの測定結果を示す。表面粗さは、ショットサイズが大きいほど、またショット硬さが高いほど大きいことがわかる。したがって、表面粗さは小さい方から $C < B < A < D$ となる。また、疲労強度との対応では、その影響は決定的ではない。

図3-3～6に疲労試験のS-N線図を示す。

図3-3 S-N線図（条件B）

図3-4 S-N線図（条件C）

図3-5 S-N線図（条件D）

図3-6 S-N線図（条件A）

10^7 回の疲労強度の高い方から、 $B(\pm 485\text{MPa}) > C(\pm 480\text{MPa}) > D(\pm 475\text{MPa}) > A(\pm 460\text{MPa})$ となった。この疲労強度順位は表面残留応力の順位にほぼ対応することがわかる。また、表面粗さの小さいB,Cも疲労強度の高い条件

Fig. 3-3 S-N curve (condition B)

Fig. 3-4 S-N curve (condition C)

Fig. 3-5 S-N curve (condition D)

Fig. 3-6 S-N curve (condition A)

となっている。

したがって、疲労強度が高かったのは、表面残留応力値が高く、表面粗さの良い、比較的加工度の小さいSP条件の

Table 3-11 Condition of double peening

記号	SP条件	投射量 (kg/分)	投射時間(秒)	アークハイト mmA	カバーレージ(%)
F	1段目: φ0.6 CCW 700HV 80m/s	↑	60×2 方向	0.380A	300
	2段目: φ0.3 CCW 700HV 40m/s	↑	75×2 方向	0.100A	↑
J	1段目: φ0.3 CCW 700HV 40m/s	↑	75×2 方向	0.100A	↑
	2段目: φ0.1 MSB 840HV 60m/s	↑	60×2 方向	0.145N	↑

Fig. 3-7 Distribution of residual stress with deep crossing point after double peening (principal stress direction)

Fig. 3-8 Surface roughness of inside of coils with deep crossing point after double peening [Ry, Rz (μm)]

B, Cであった。このことは、残留応力のクロッシングポイントが大きいことは疲労強度へ及ぼす影響が小さいという結果になる。

(b) ダブルSP法

クロッシングポイントの大きいダブルSPと、高硬度・微細ショット粒により、表面値の向上を狙ったダブルSPについて疲労強度の比較を行なった。

選定した2つのショットピーニング条件を表3-11のF, Jとして示す。

クロッシングポイントの大きいダブルSP条件Fの残留応力分布を図3-7に示す。

2段目の投射により、表面値で約200MPa圧縮の残留応力値が増加している (DとFの比較)。最大表面粗さを図3-8に示す。2段目の投射により僅かに向上している (DとFの比較)。

Fig. 3-9 Distribution of residual stress after double peenning by very small shots with high hardness (principal stress direction)

Fig. 3-10 Surface roughness after double peenning by very small shots with high hardness

高硬度・微細ショット粒により、表面値の向上を目的としたダブルSP条件Jの残留応力分布を図3-9に示す。2段階の投射により、表面値で約150MPa圧縮の残留応力値が増加している（BとJの比較）。

図3-10に表面粗さを示す。最大表面粗さは約5 μ mである。

図3-11-1～2に疲労試験のS-N線図を示す。10⁷回の疲労強度は、J(±540MPa) > F(±525MPa)であった。シングルSPに対して、JはBから約55MPa、FはDから約50MPa向上した。

(c) ストレスSP法

選定した条件（表3-12に詳細を示す。）でSP処理をし、実験を行った。

図3-12、13に、エアー投射のダブルSPとストレスSPの残留応力分布を示す。2段階目の投射で、ストレスSPすると、コイル内側の表面値で約150MPa圧縮の残留応力値が増加する。また、残留応力値の異方性が見られ、コイル内側直交方向の値は小さい。（GとH）

図3-14に、最大表面粗さの測定結果を示す。2段階目投射における、ストレスの有無による表面粗さの差は見られない。

図3-15に疲労試験のS-N線図を示す。10⁷回の疲労強度は、G(±515MPa) > H(±495MPa)であり、ストレスSPにより疲労強度は向上しなかった。

(d) 焼入・焼戻しばねに対するダブルSP法

Fig. 3-11-1 S-N curve after double peenning

Fig. 3-11-2 S-N curve of double peenning

Table 3-12 Condition of stress peening

分類	図号	SP条件	投射量 (kg/分)	投射時間(秒)	アーケハイトカバレッジ (mmA (%))
ダブルSP (エアー投射)	G	1段階: φ0.6 CCW 700HV 80m/s	7.6	60×2 方向	0.388A
		2段階: φ0.3 CCW 700HV 0.3MPa	7.6	120mm/min×2 方向	0.105A
ストレスSP (エアー投射)	H	1段階: φ0.6 CCW 700HV 80m/s	90	60×2 方向	0.388A
		2段階: φ0.3 CCW 700HV 0.3MPa	7.6	120mm/min×2 方向	0.105A

Fig. 3-12 Distribution of residual stress after double peenning through nozzle

焼入・焼戻した高硬度ばねにより疲労強度向上の可能性を追求した。焼入・焼戻しばねは、これまでの試験に用いていたOT線のばねに焼入（850℃×20分）・焼戻し処理（360℃×60分）を行い製作した。一般工程ばねと焼入焼戻しばねの硬さの比較を図3-16に示す。焼入・焼戻しばねの

Fig. 3-13 Distribution of residual stress after stress peening

Fig. 3-14 Surface roughness after stress peening

Fig. 3-15 S-N curve after stress peening

Fig. 3-16 Distribution of hardness of coil spring

Ordinary spring

Spring quenched and tempered

Photo. 3-2 micro-structure (×400)

Table 3-13 Condition of peening for springs quenched and tempered

分類	記号	SP条件	投射機 (kg/min)	投射時間 (秒)	アークハイト mmA	カバーレージ (%)
シングルSP	K	1段目: φ0.3 CCW 700HV 40m/s	90	75×2 方向	0.100A	↑
ダブルSP	L	1段目: φ0.3 CCW 700HV 40m/s	↑	75×2 方向	0.100A	↑
		2段目: φ0.1 MSB 840HV 60m/s	↑	60×2 方向	0.140N	↑

平均硬さは約670HVでOT線を使った一般工程ばねの表面の平均硬さ約600HVより、約70HV硬さが高いことがわかる。この硬さは、通常のOT線では得られない硬さである。組織の比較を写真3-2に示す。焼入・焼戻しばねの組織はOT線の組織と比較し粗いことがわかる。SPは、ダブルSPで最も疲労強度の良かった条件で行なった。表3-13にSP処理条件を示す。図3-17に残留応力分布を示す。2段目の投射により、一般工程のばねと同様に、表面値で約150MPa圧縮の残留応力値が増加している。

図3-18に、表面粗さの測定結果を示す。いずれも約5μmであった。図3-19-1～4に疲労試験のS-N線図を示す。平均応力 $\sigma_m = 600\text{MPa}$ では 10^7 回を耐久したため、平均応力を $\sigma_m = 700\text{MPa}$ に上げて試験した。 10^7 回の疲労強度は、L (±555MPa) > K (±540MPa) であった。比較のため、 $\sigma_m : \sigma_a = 5 : 1$ で $\sigma_m = 600\text{MPa}$ 換算すると⁸⁾、L (±575MPa) > K (±560MPa) である。同一の条件でダブルSPした、一般OTばねに比べ、約35MPa疲労強度が向上している。

3.3.2 ばねの疲労破壊起点の特徴

(a) 破壊起点位置

図3-20に、ばね諸元に基づき、荷重1000Nを負荷した場合の、ばねの巻数に対するばね内外の表面応力の値を3次元

Fig. 3-17 Distribution of residual stress of springs quenched and tempered

Fig. 3-18 Surface roughness of springs quenched and tempered

Fig. 3-19-1 S-N curve of high strength spring (1)

Fig. 3-19-2 S-N curve of high strength spring (2)

Fig. 3-19-3 S-N curve of high strength spring (3)

Fig. 3-19-4 S-N curve of high strength spring (4)

Fig. 3-20 Relationship between number of coil and stress computed by Finite Element Method

ソリッドモデルによる有限要素法で計算した結果を示す。コイル内側の応力が最も高く、また巻数での周期性が見られる。図3-21に、ばねの疲労試験での生じた巻数に対する疲労破壊発生頻度の関係を示す。疲労破壊発生頻度は周期性があり、図3-20の応力の高い位置とよく対応していることがわかる。

(b) 破面観察結果

折損品の破面のSEM観察を行なった。折損の起点は、「Stage I に対応する表面の三角形のせん断形初期き裂」

Fig. 3-21 Distribution of coil position fractured

Photo. 3-3 SEM photographs of surface of springs fractured

「内部の非金属介在物」, 「内部ファセット」(写真3-3)に分類できる。図3-22にその割合を示す。シングルSP, ダブルSPは, ほとんどが表面を起点としていたが, ストレスSPと高硬度ばねには内部起点も発生した。特に高硬度ばねは非金属介在物が高い確率で発生した。これは, 第一原因として, ストレスSPと高硬度ばねでは表面圧縮残留応力が高く表面からの破壊が防止されたためと考えられる。また, 高硬度ばねでのより高い頻度での非金属介在物からの破壊は, 硬さが高くなり, 非金属介在物に対する感受性が増加したためと考えられる。今後, さらに疲労強度を高めるためには, SPによりクロッシングポイントをより大きくして, 非金属介在物周りに圧縮の残留応力を付与し, 非金属介在物の影響を低めることが有効な手段の一つだと思われる。

Fig. 3-22 Frequency on result of fracture

Fig. 3-23 Relationship between depth of shear type crack in early stage and crossing point

Fig. 3-24 Distribution of hardness in cross section of torsional specimen and spring (condition of peening : A maximum residual stress in surface)

せん断形初期き裂 (Stage I) の深さと残留応力のクロッシングポイントの関係を図3-23に示した。両者の値は良く一致している。したがって, Stage I からStage II への遷移点は残留応力がゼロになる地点に対応している。Stage II き裂の進展はクロッシングポイントより深い位置となっている。

3.3.3 ねじり疲労試験, 中村式回転曲げ試験, 片持ち式回転曲げ試験結果

図3-24にねじり試験片 (片持ち回転曲げ試験片) およびばねの硬さ分布を示す。両者共, 表面近傍約0.05mm付近がSPによる加工硬化によって50HVほど硬さが上昇していることがわかる。

コイルばねと同様, 各試験片にシングルSP条件として表3-4に示すA~DまでのSP処理を行った。また, ねじり試験片についてはダブルSP (φ 0.3mm, ショット硬さ700HV, 投射

Fig. 3-25 S-N curve of torsional specimens

Fig. 3-26 S-N curve of cantilever type rotary bending fatigue test pieces

Fig. 3-27 S-N curve of Nakamura type rotary bending fatigue test pieces

速度40m/s+ ϕ 0.1mm, スチールショット 840HV, 60m/s)を行ったものも試験した。図3-25～27に各疲労試験片のS-N線図を示す。各試験片ごとの疲労順位は $B > D \geq C > A$ であり、ほぼ同じ傾向にある。ねじり試験片では、耐久限は向上しなかったものの、時間強度を考慮すればダブルSPを行ったものが最も疲労特性は良い。また、この傾向はコイルばねの疲労試験結果図3-3～6とほぼ対応している。したがって、SPの疲労強度向上効果はコイルばね、ねじり、線材回転曲げそして回転曲げの間で大きな差異はない。

以上のように、SP条件のねじり疲労試験、中村式回転曲げ試験、片持ち式回転曲げ試験結果へ及ぼす影響がほぼ等しいことから、ねじり試験について考察を行った。図3-28に各SP条件と残留応力分布の関係を示す。小さく硬いショットでSP処理した試験片ほど表面での残留応力値が高くなる傾向が見られる。また表面の残留応力値が高い試験片ほど疲労強度は高くなる傾向が見られ、疲労強度を高くするには表面の残留応力値を高くすることが有効であると考え

Fig. 3-28 Relationship between condition of peening and distribution of residual stress

Fig. 3-29 Relationship between surface roughness and fatigue strength

Photo. 3-4 SEM photographs of fracture surface

られる。

図3-29にSP条件と表面粗さの関係を示す。コイルばねのシングルSPの結果と同様に、疲労順位と表面粗さには明確な関係は見られない。

3.3.4 疲労起点の特徴

ねじり試験片での疲労起点は、表面起点と内部ファセットの2種類であった。写真3-4に表面起点と内部ファセット起点の代表的なSEM観察写真を示す。表面起点はコイルばねに認められた、Stage 1に対応する表面の三角形のせん断

Fig. 3-30 Relationship between condition of peening and frequency of internal facet

Fig. 3-31 Relationship between crossing point and internal facet depth

形初期き裂ではなく、最大主応力面に一致するものである。したがって、ねじり試験片においては、Stage I き裂はほとんど成長せず、当初より Stage II き裂の伝播が生じたことがわかる。図3-30に各SP条件と表面起点と内部ファセットの発生頻度の関係を示す。疲労強度が高いSP条件のものほど内部ファセットから折損する割合が高くなる傾向が見られる。これは疲労強度が高いものほど表面の残留応力値が高いため、内部から折損したものと思われる。図3-31にクロッシングポイントと内部ファセットの位置の関係を示す。内部ファセットの位置とクロッシングポイントの位置はあまり良い対応ではないが、ほぼクロッシングポイントに近い位置に内部ファセットは認められ、内部起点は残留応力が小さい位置から生じることがわかる。

3.4 まとめ

(1) 疲労強度について

シングルSPによる各疲労試験片の疲労順位はばね、ねじり、片持ち式及び中村式回転曲げ試験片ではほぼ同等であった。また、ダブルSPを行うことでシングルSPよりも更に疲労強度は向上することがばねとねじり試験の結果から示された。

表3-14に、ばねの 10^7 回の疲労強度を示す。各SP条件ごとの疲労特性について、以下に示す。

① シングルSP法

Table 3-14 Relationship between fatigue strength of springs and condition of peening

	分類	記号	SP条件	$r_m=600$ の 10^7 回 疲労強度 (MPa)
シングルSP		A	$\phi 0.6$ CCW 550HV 80m/s	± 460
		B	$\phi 0.3$ CCW 700HV 40m/s	± 485
		C	$\phi 0.3$ CCW 550HV 40m/s	± 475
		D	$\phi 0.6$ CCW 700HV 80m/s	± 475
ダブルSP		F	1段目: $\phi 0.6$ CCW 700HV 80m/s 2段目: $\phi 0.3$ CCW 700HV 40m/s	± 525
		J	1段目: $\phi 0.3$ CCW 700HV 40m/s 2段目: $\phi 0.1$ SS 840HV 60m/s	± 540
	比較用ダブルSP (エアーク射)	G	1段目: $\phi 0.6$ CCW 700HV 80m/s 2段目: $\phi 0.3$ CCW 700HV 0.3MPa	± 515
	ストレスSP (エアーク射)	H	1段目: $\phi 0.6$ CCW 700HV 80m/s 2段目: $\phi 0.3$ CCW 700HV 0.3MPa (ばねの耐力 950MPa)	± 495
焼入焼戻ばね ダブルSP	比較用シングルSP	K	1段目: $\phi 0.3$ CCW 700HV 40m/s	± 560
	ダブルSP	L	1段目: $\phi 0.3$ CCW 700HV 40m/s 2段目: $\phi 0.1$ SS 840HV 60m/s	± 575

コイルばねでは表面残留応力値が高く、表面粗さが小さいB, Cが、クロッシングポイントが大きく、表面粗さの大きいA, Dより疲労強度が高い。また、ねじり試験においては表面残留応力の最大条件B、表面粗さ最大条件D、表面粗さ最小条件Cそして表面残留応力最小条件Aの順に疲労強度は高い結果となった。すなわち残留応力深さの効果は小さい結果となった。

② ダブルSPの効果

ダブルSPによって、シングルSPより疲労強度が向上した。高硬度・微細ショット粒により表面残留応力値の向上を狙ったJが、クロッシングポイントの大きいFより疲労強度が高い。

③ ストレスSPの効果

弁ばねサイズの小型ばねへの投射方法の検討が不十分なこともあり、疲労強度は向上しなかった。

④ ばねの硬さ向上の効果

コイルリング後の焼入・焼戻により、OT線ばねより硬さを高めたことにより疲労強度が向上し、従来にない高い疲労強度が得られた。

但し、介在物からの折損が顕著に増加することから、硬さ増加させたばねには深い残留応力分布も必要になるものと考えられる。

(2) せん断型初期き裂の深さと残留応力の関係

せん断型初期き裂の深さとクロッシングポイントの値は良く一致しており、せん断形初期き裂の先端が、圧縮の残留応力がゼロになる地点から、Stage II き裂の進展が始まっていることが分かった。

4. ばねの残留応力測定方法のガイド作成とSPによる残留応力補正に関するシミュレーション

4.1 ばねの残留応力測定方法のガイド作成

4.1.1 目的

現在、残留応力の測定法はほとんどX線回折により行われている。今回対象となっている弁ばねのような、比較的細い線材の残留応力測定については、これまで測定条件や

Table 4-1 X-ray diffraction apparatus and condition of measurement

X線回折装置	PSPC微小部X線応力測定装置
測定条件	ターゲット : Cr フィルタ : V 管電圧 : 30KV 管電流 : 30mA コリメータ径 : 0.15~4mm θ 角 : 0~45°

Table 4-2 Test pieces and condition of peening

試験片	材質	線径	SP処理
	HRS7V	4mm	SP1
	SWOSC-V	0.15~3mm	SP2
SP1	ショットサイズ	投射速度	カバレッジ
	ϕ 0.6mm	80m/s	300%
SP2	ショットサイズ	噴射圧力	カバレッジ
	ϕ 0.4mm	0.3MPa	200%

測定方法が確立されておらず、再現性や信頼性の点で必ずしも十分なものではなかった。

そこで、X線回折条件、測定方法、評価方法などについてのガイドラインを作成することを目的に、弁ばねならびに各種の線材について種々の条件で残留応力の測定を行い、適切な測定方法を検討する。

今回の報告では、まず線材の被加工材に対して、どの程度のX線照射面積が適正であるかを検討するために、5種類の線径の試験片についてX線回折装置のコリメータ径を6段階に変化させて、SP加工面の残留応力測定を行い、残留応力値を検討した。

4.1.2 実験方法

使用したX線回折装置及び測定方法を表4-1に示す。試験片及びSP条件を表4-2に示す。

4.1.3 実験結果

今回ように、試験片の線径 (D_p) とコリメータ径 (D_c) をそれぞれ変化させた場合、それらの組合せの中で相似則が成り立つ。両者の比 D_c/D_p をとり無次元化して測定結果を表示したのが図4-1である。両者の比が大きい場合、すなわち線径に対しコリメータ径が大きい場合は、線径の影響により正しい測定ができておらず、残留応力の値は減少する。一方、両者の比が十分小さい場合は、残留応力値はほぼ一定となり、平面の測定と同様に行うことができる。

4.1.4 まとめ

線径の1/2から1/3以下の径のコリメータを使用することにより、信頼性の高い残留応力値を得ることができる。

4.2 SPによる残留応力補正に関するシミュレーション

4.2.1 目的

コイルばねに対する①ショットピーニング加工後の残留応力の発生、②残留応力測定後の応力補正に関するシミュレーションの可能性についての調査・検討を行うため、1998年8月から1999年3月までの期間でWG（ワーキンググル

Fig. 4-1 Relationship between ratio of diameter of collimator to diameter of wire and residual

Fig. 4-2 Pattern of residual stress

ープ) 活動を行った。

ショットピーニング加工後の残留応力の発生に関しては、単一痕生成、複数痕生成程度であれば、弾塑性解析を利用した有限要素法 (FEM) により解析可能であるが、現在のコンピュータ環境では、精度の高いシミュレーションは時間がかかりすぎるので現実的ではないとの結論に至った。そのため、残留応力分布の補正に関するシミュレーションのみ本研究委員会でも継続して活動を行ってきた。

4.2.2 従来の残留応力補正式^{9), 10)}

コイルばねのショットピーニングによる深さ方向残留応力分布の測定は外周から表面層を化学研磨で段階的に溶かして、各段階における表面応力をX線応力測定装置で測定した後、ハイン (Heyn) の式で補正している。

ハインの補正式は①丸棒の軸方向だけに残留応力がある、②その残留応力は軸に沿って一定である (図4-2)、という前提条件の基に補正式が算出されており、具体的には下記の方法で求めることができる。

初め半径 b であった丸棒を外周から同心層状に除去していき、各段階の半径 ξ でX線により表面の軸方向残留応力を測定しこれを σ_{zx} とすると、ある半径 r の位置に最初にあった残留応力 σ_z は式 (2) から求められる。

$$\sigma_z = \sigma_{zx} - 2 \int_{\xi=r}^b \frac{\sigma_{zx}}{\xi} d\xi$$

右辺第1項：半径 r まで削ったとき、その表面でX線により測定された軸方向応力

右辺第2項：半径 b から r まで削る間に半径 r の表面で増加した残留応力

4.2.3 残留応力補正のシミュレーション

まず軸方向だけに残留応力がある場合の応力補正シミュレーションを行い、ハインの補正式から得られる値と比較した。また、実際のショットピーニング加工では均一的に

Fig. 4-3 Place analyzed

Fig. 4-4 Model of analysis

Fig. 4-5 Distribution of residual stress before correction

残留応力が付くため、円周方向にも残留応力がある場合のFEM解析を行った。

なお、解析には汎用FEMソフトMSC.MARCを用いた。

(1) 解析モデル

- (a) 寸法：丸棒の外形=φ4.0mm
解析部分：軸方向に4mm (図4-3)
- (b) 材料物性：E=206000MPa, ν=0.3
- (c) 要素の分割状況：図4-4に示す。
4節点軸対称要素 (1200要素, 1271節点)
- (d) 拘束条件：Z=0上の節点のZ方向変位を拘束。

(2) 解析手順

- (a) 丸棒の表面から0.2mmの深さ範囲に圧縮応力を初期応力として与える。
- (b) 解析を1ステップ進め応力の釣り合いを取り、この状態の応力を丸棒に最初から存在する残留応力(σ_z)とした。なお、応力は図4-4の左端の要素で取得した。
- (c) 最外周の要素を除去し表面の応力を求める。この応力がX線により測定される残留応力(σ_{ZX})に相当する。なお、要素の除去には要素の休止機能 (deactivate)を用いた。
- (d) (c) の操作を繰り返し、各深さの表面応力 (σ_{ZX})

Fig. 4-6 Distribution of residual stress before and after correction

Fig. 4-7 Distribution of residual stress before correction

を求めた。

(3) 解析結果

(a) 軸方向の残留応力のみを与えた場合

図4-5で示すように軸方向の残留応力(σ_z)だけを与えた後、段階的に要素を除去し各深さの軸方向応力(σ_{ZX})を求めた。FEM解析から得られたこのσ_{ZX}を(2)式に適用し、ハインの残留応力補正と比較した結果を図4-6に示す。FEM解析とハインの補正値とは良い対応を示している。

(b) 軸方向および円周方向の残留応力を与えた場合

図4-7に示すように軸方向応力(σ_z)、円周方向応力(σ_θ)、半径方向応力(σ_r)を与えた後、(a)と同様な解析を行った。図4-8は軸方向の残留応力に関し、ハインの補正式から得られる値と比較した結果を示す。円周方向の残留応力がある場合でも軸方向応力補正に関するFEM解析結果とハインの補正値とは良い対応を示している。

また、図4-9にはFEM解析から得られた補正前後の円周方向残留応力分布の結果を示す。

4.2.4 残留応力補正に関するシミュレーションのまとめ

- (1) ショットピーニング加工をした際の深さ方向の残留応力分布は、外周から段階的に薄層を除去した後、表面応力をX線応力測定装置で測定し、ハインの式により薄層を除去したことによる影響を補正して求めている。ハインの補正式の前提となっている軸方向のみの残留応力を与えた時のFEM解析結果はハインの式から得られる値と同一の結果となり、残留応力補正に関してFEMによるシ

Fig. 4-8 Distribution of residual stress of axial direction before and after correction

ミュレーションで解析可能であることが確認できた。

- (2) ショットピーニング加工した時は軸方向以外に円周方向の残留応力も存在するが、その場合でも軸方向の残留応力補正に関するFEM解析結果はハインの補正式から得られる値とほぼ同一の結果となった。
- (3) コイルばねにショットピーニング加工を行った時の残留応力は、コイル素線へのショットのあたり方が均一でないため、場所により残留応力値が異なる。今回のシミュレーションは丸棒を対象とし応力分布も軸対称としているため2次元軸対称問題として取り扱ったが、3次元モデルで残留応力分布も3次元的に付与した後、同様な解析を行えば深さ方向の残留応力の補正解析が可能となると考えられる。

5. 総 括

本共同研究で得られた結果は以下のようにまとめられた。

- (1) 高強度ばね材のショットピーニング条件を管理するアルメンストリップとして板厚1.3mm、硬さ58HRCの高硬度アルメンストリップを提案した。
- (2) 高強度材に最適なショットピーニング条件の検討
 - ①ばねの疲労試験、ねじり疲労試験、片持ち式回転曲げ疲労試験および中村式回転曲げ疲労試験による疲労強度順位の違いはほぼないと判断される。
 - ②シングルショットピーニングでは、表面残留応力値が高く、表面粗さが小さいSP条件が疲労強度が高い。また、残留応力深さの疲労強度向上効果は小さい。
 - ③ダブルショットピーニングでは、高硬度・微細ショット粒を用いたダブルショットピーニングが最も疲労強度向上効果が大きい。
 - ④ストレスショットピーニングに関する今回の実験では、高硬度・微細ショット粒を用いたダブルショットピーニングと比較して疲労強度は向上しなかった。
 - ⑤コイルリング後の焼入・焼戻により硬さを高め、高硬度・微細ショット粒を用いたダブルショットピーニングを行ったばねは最も高い疲労強度を示した。
- (3) ショットピーニング材の疲労現象の解明
 - ①疲労強度向上に最も寄与するのは圧縮残留応力であり、かつ表面の値である。この効果はばね硬さを高めるこ

Fig. 4-9 Distribution of residual stress of residual axial direction before and after correction

とで一層顕著となる。

- ②表面破壊の場合、コイルばねではStage I き裂が発生・伝ばした後、Stage II き裂の伝ばへと引き継がれる。Stage I き裂の大きさはほぼクロッシングポイントの深さに対応している。
- (4) ばねの残留応力測定方法のガイド作成とショットピーニングによる残留応力補正に関するシミュレーション
 - ①コイルばねのような曲率を有する線材にX線応力測定を用いる場合には、X線照射野の大きさは線径の1/3~1/2以下とする必要がある。
 - ②有限要素法によって残留応力補正をシミュレーションすることは可能である。また、現在、一般に用いられているハインの補正式はショットピーニングの残留応力補正法として実用性がある。
- (5) SP関連システムのフレーム構築に関しては、SP加工による表面欠陥の導入の定量化とそのき裂が残留応力場のなかでStage I もしくはStage II の伝ばをシミュレーションすることになる。本研究委員会の活動においては、SP加工条件と表面欠陥の定量化およびStage I き裂の伝ばの定量化が不可能であった。今後の課題としたい。

6. おわりに

約3年半に渡る委員会活動において、さまざまな御協力及び御助言を頂きました各位に感謝致します。

参考文献

- 1) 小物ばねのSPに関する研究、ばね論文集, NO.27, (1982), 73
- 2) SPの諸問題に関する準備委員会報告 共同研究課題の提案、ばね技術研究会、1996年春季講演会講演論文集, (1996), 37
- 3) 丹下, 阿久津, 高村, ばね鋼におけるショットピーニング残留応力分布とき裂伝播寿命の関係について、ばね論文集, NO.36, (1991), 47
- 4) 村上, 小林, 牧野, 鳥山, 栗原, 高崎, 江原 ばね鋼の疲労強度に影響を及ぼす介在物, ショットピーニング, 脱炭層, 微小表面ピットの総合的評価, ばね論文集, NO.39, (1994), 7

-
- 5) SAEJ442, (1979)
 - 6) G.C.Bird,et.al.,SPRINGS,Oct. (1986), 69
 - 7) 例えば 第3版 ばね,丸善 (1982), 429
 - 8) 弁ばね用高強度Si-Cr鋼オイルテンパー線の研究,
ばね論文集, NO.40, (1995), 82
 - 9) 小物ばねの耐久性に関する調査報告書, (社) 日本ばね工業会, 1984
 - 10) 応力測定マニュアル,オーム社, (1972), 346