〔技術論文〕

数種のばね鋼の曲げ疲労試験結果からみた鋼種特性

On the Bending Fatigue Properties of Several Spring Steels

丸田 良平* 荒川 武二* 宮川 哲夫* 鈴木三千彦*

Ryōhei MARUTA, Takezi ARAKAWA, Tetsuo MIYAGAWA, Michihiko SUZUKI

1. 緒 言

近年、自動車が発達するにつれて自動車ばねの設計応力を高め、軽量化を計る必要性が大となってきた。従来のばねは大部分が 100kg/mm^2 以下の比較的低い設計応力であったが、耐疲労性をいちぢるしく改善する各種の表面処理技術などが発達した今日、より高い設計応力のばねも当然期待される。この場合でもやはりばね鋼本来の耐疲労性が先づ重要視される。

著者らは汎用ばね鋼の数種を用い、各種の硬度に熱処理後協会型リーフ疲労試験機で部分片振り平面曲げ疲労

試験を行なって、低応力から高応力にいたる疲労寿命の変化を調べ、鋼種別、熱処理硬度別に整理し、実用の参考に供しようとした。

2. 実験方法

2.1 供試材

供試材の寸法は全ての鋼種が中心部でも十分焼入硬化するように配慮し、断面が $50 \times 5\text{mm}$ 又は $50 \times 4\text{mm}$ に熱間圧延した平鋼を用いた。その寸法および化学成分は第1表の通りである。

第1表 供試材の圧延寸法と化学成分

鋼 種	断 面 寸 法	化 学 成 分 (%)							
		C	Si	Mn	P	S	Cr	V	B
SUP 6	$50 \times 5\text{mm}$	0.55	1.65	0.85	0.010	0.009	0.09	—	—
SUP 6 -R	50×4	0.61	1.62	0.79	0.012	0.022	0.43	—	—
BSUP 6	〃	0.59	1.64	0.82	0.014	0.025	0.12	—	0.001
SUP 8	〃	0.57	1.08	0.46	0.015	0.011	0.92	—	—
SUP 9	50×5	0.54	0.30	0.89	0.010	0.016	0.78	—	—
SUP10	50×4	0.50	0.21	0.77	0.015	0.009	1.00	0.18	—
50Mn 7	〃	0.45	0.30	1.72	0.018	0.019	0.14	—	—
50MnV 7	〃	0.53	0.29	1.65	0.015	0.010	0.07	0.09	—

2.2 熱 処 理

各鋼種共 850°C から油焼入した後、焼戻温度を変えて硬度が BHD2.7 から BHD3.3 まで 0.15mm とびの5段階になるように調整した。これら鋼種と焼戻温度との関係を第2表に示す。

2.3 一般的な材質の調査

熱処理した試験片の顕微鏡組織、非金属介在物、オーステナイト結晶粒度、表面粗さ、脱炭深さなどを調べて各鋼種の差異を確認しておくと同時に、焼戻性能曲線も

第2表 各鋼種の目標硬度と焼戻温度

目標硬度 BHD	焼 戻 温 度				
	2.70	2.85	3.00	3.15	3.30
鋼 種					
SUP 6	380°C	430°C	480°C	530°C	570°C
SUP 6 -R	400	430	480	550	600
BSUP 6	400	450	500	530	570
SUP 8	400	450	500	550	600
SUP 9	340	390	430	470	500
SUP10	300	400	450	530	580
50Mn 7	300	350	400	450	500
50MnV 7	300	370	450	500	550

* 愛知製鋼株式会社

別途求めて鋼種特性を把握した。

2.4 疲労試験

各鋼種、各硬度の試料を第3表の諸条件に設定して協

第3表 疲労試験条件

試験応力 (kg/mm ²)	10~90	10~100	10~110	10~120	10~130	
スパン (mm)	50×4 mm	237.0	223.3	211.7	201.8	192.7
	50×5 mm	265.5	250.5	237.0	226.0	216.5
ストローク (mm)	各10					
繰返数	1000 C. P. M					

会型リーフ疲労試験機にて疲労試験を行なった、試料の数は同一熱処理、同一応力条件につき最小3ケ、最大5ケの試料を使い、各プロットはそれらの平均値で示した。

3. 実験結果

3.1 一般的な材質特性

各鋼種の非金属介在物、オーステナイト結晶粒度、表面粗さ、脱炭深さなどをまとめて第4表に一覧する。非金属介在物の量は鋼種により異なっているが、オーステ

第4表 各鋼種の材質的な特性

鋼種	非金属介在物 (点算法)			結晶粒度 900°C× 1h Go	表面粗 さ* JIS法	素地迄 の* 脱炭深 さmm
	A系	B系	C系			
SUP 6	0.06	0	0.02	7.8	21.3	0.01
SUP 6-R	0.12	0	0.04	7.9	17.0	0
BSUP 6	0.14	0	0.03	7.6	15.3	0.01
SUP 8	0.05	0	0.06	7.5	19.0	0
SUP 9	0.03	0	0.02	7.6	19.0	0
SUP10	0.10	0	0.02	8.0	19.5	0
50Mn 7	0.08	0	0.05	7.9	15.3	0
50MnV 7	0.03	0	0.04	7.3	15.3	0

* 印は所定の焼入焼戻後測定

ナイト結晶粒度、表面粗さおよび脱炭深さは大差がみられない。

顕微鏡組織的には SUP10, 50Mn7, 50MnV7 の三種は微細なマルテンサイトが焼戻されたち密なソルバイト組織を呈する点が特徴である。磁気分析法によって焼戻過程において残留オーステナイトが分解し終る温度をみると、含Si鋼は全て約400°C, 50Mn7, 50MnV7, SUP10は約250°Cであった。従って本疲労試験に用いた試料は第2表から残留オーステナイトがないとみてよい。

3.2 協会型リーフ疲労試験結果

3.2.1 各鋼種の硬度別にみた S-N 曲線

第1図～第3図は供試8鋼種の BHD2.7, 3.0, 3.3の三種の硬度における S-N 曲線を示す。高硬度の第1図

第1図 焼戻硬度が BHD2.7 の S-N 曲線

第2図 焼戻硬度が BHD3.0 の S-N 曲線
(記号は第1図と同じ)

第3図 焼戻硬度が BHD3.3 の S-N 曲線
(記号は第1図と同じ)

では時間強度は BSUP 6 が最も大きく、SUP 9 が最も小さい。その他の鋼種はほぼこの中間に位置するが、 $10 \sim 130 \text{ kg/mm}^2$ の高応力では BSUP 6 に次いで 5 Mn 7, SUP 8 が優れている。

次に BHD3.0 の場合は第2図のようになり、高硬度の第1図とは様相が異なる。ここで時間強度の大きい鋼種は BSUP 6, 50Mn 7 で含 Cr の SUP 8, SUP 6 R, SUP 9 が最も劣る。これらの中間が SUP 6, SUP 10 である。

さらに最も低硬度の BHD3.3 の場合は第3図のようになり、再び高硬度の第1図とほぼ同様の傾向を示すようになる。

このように各鋼種の時間強度の差は高硬度域では大きい、その後 BHD3.0 レベルではこの差が小さくなり、さらに BHD3.3 と軟化するにつれてこの差が僅かに増加する。

3.2.2 疲労寿命の硬度および応力依存性

供試した 8 鋼種はその合金成分がそれぞれに異なっているが、鋼種別に疲労寿命を硬度と応力で区別してみるとほぼ二つの形態がえられる。すなわちその一つは応力の大小にかかわらずある一定の焼戻硬度の点で最高の疲

第4図 SUP 6 R の疲労寿命と硬度、応力との関係

第5図 SUP 8 の疲労寿命と硬度、応力との関係

疲労寿命を示す形で、他の一つは応力によって多少の変動はあるが、ある一定の硬度範囲で疲労寿命の谷を示す形である。後者の形態は本実験内では SUP 6 R と SUP 8 の二鋼種だけに現れた。その例を第4図と第5図に示す。第4図は SUP 6 R の例であるが、応力が 120 kg/mm^2 以上の場合 BHD3.0 附近に疲労寿命の谷があるが、さらに低応力側ではこの谷が低硬度側に移行する傾向を示している。第5図の SUP 8 についてもほぼ同様のことがいえる。

第6図 SUP6の疲労寿命と硬度、応力との関係

第8図 SUP10の疲労寿命と硬度、応力との関係

第7図 SUP9の疲労寿命と硬度、応力との関係

第9図 50Mn7の疲労寿命と硬度、応力との関係

これ以外の鋼種は一般的な形態で第6図～第9図に数例を示したように、何れの鋼種も応力の大小によらず BHD3.0 の近傍で最高の疲労寿命を示す。なお図中の各曲線の右側の数値は最高応力の値を示している。第6図の SUP6 の低応力の場合の寿命の山は SUP9 や SUP10ほど顕著ではない。山の勾配の大きな SUP9 や SUP10は焼灰硬度または温度が適性値をはずれると敏感に疲労寿命の低下を招くことを示しており、この点では SUP6 のような Si-Mn 系が鈍感で硬度依存性が小さい。

単純な Mn 鋼である 50Mn7 は第9図のように 110kg/mm² 以下の低応力の場合疲労寿命の硬度依存性は BHD 2.8 以上で著しく小さくなる。これは Mn 鋼の特徴といえよう。しかし 120kg/mm² 以上の高応力になると何れの鋼種も硬度依存性が小さくなり、割合に安定した寿命が得られる。

4. 考 察

4.1 合金元素と疲労寿命の関係

広い硬度範囲にわたって疲労寿命が最も大きかったのは BSUP 6 であったが、SUP 6 が供試鋼のほぼ中間程度であったことから B は単に焼入性を増加させるのみにとどまらず、耐疲労性におよぼす合金元素としての効果も大いに期待される。

疲労寿命で SUP 6 R と SUP 8 は硬度依存性に谷が現われたが、この現象は焼戻硬度を変化させた静的な機械的性質からは全く予測されない。従って焼戻過程に起る物理冶金的な変化に呼応する現象と考えられるが、未だ確証を得ていない。しかし両鋼種とも Si と Cr を含有することからみると合金組成に基因する可能性が強いと考えられる。

4.2 本実験結果と回転曲げ疲労試験結果の相関性

本実験とは別に供試 8 鋼種と同一チャージで 25mm ϕ を熱間圧延し BHD3.0 の硬度レベルに熱処理して S—N 曲線および疲労限を求めた。その結果回転曲げ疲労の時間強度と平面曲げ疲労の時間強度との間には何の関係もなかった。

4.3 非金属介在物の影響

本実験に供試した鋼は鋼種により非金属介在物量が異なっている。そこで比較的 C 系介在物の多かった 50Mn 7 を 10~120kg/mm² の応力で疲労試験後、破面近傍の介在物や組織の様相を電子顕微鏡で入念に観察した。その結果圧延方向断面では写真 1 のような基地中に A 系、

写真 1 50Mn 7 BHD3.0 の基地 ×5,000

写真 2 A 系介在物 ×5,000

写真 3 C 系介在物 ×5,000

C 系介在物がそれぞれ写真 2、3 のようにみられ、疲労試験によって介在物自身がクラックしたり、あるいは介在物の界面にマイクロクラックが発生したような形跡は全くみられなかった。この点は SUP 6 やその他の鋼種についても同様であった。

一方圧延直角方向の断面では A 系介在物は写真 4 のように何等変化なく、A 系と C 系が共存するような場合、写真 5 にみられるようにその界面にマイクロクラックが認

写真4 A系介在物横断面 ×5,000

められたが、これは基底迄発達せず止まっており、その数は極めて少なく疲労寿命には影響しないものと考えられる。またこのクラックが熱処理によって発生したのか疲労試験によって発生したのかは目下調査中である。

以上の組織的観察結果と第4表に示した各鋼種の介在物量と疲労寿命との関係からみて本実験においては介在物が疲労寿命に与える影響は殆んどないものとする。

4.4 高応力ばねに関する考察

120~130kg/mm²の高応力下では何れの鋼種も疲労寿命の硬度依存性が低下することが知られた。実車のばねはショットピーニングやストレスピーニングを施して表層に圧縮応力を残留させている。この場合表層の残留応力の状態が疲労寿命に大きく影響することは衆知の事実であるが、被ショット材の硬度によって残留応力の量や

写真5 共存介在物 ×5,000

分布形態が変わることは容易に想像される。幸いにも高応力下では材質本来の疲労寿命が硬度（焼戻温度）に依存する程度が小さくなるので、高応力ばねの場合適性硬度は鋼種やショット条件と併せて考えるべき問題であろう。

5. 結 言

汎用ばね鋼数種を板に圧延した後、種々の硬度に熱処理し、応力を変化させて部分片振り平面曲げ疲労試験を行なった。その結果合金元素としてBの耐疲労性を向上させる効果や、合金組成からくる種々の鋼種特性などに関し有力な知見が得られた。

実用のばねは種々の表面処理を施こした状態で使用されるので、本来の鋼種特性に加えて更にこれら表面処理効果も一段と追求すべき問題である。