ばね鋼の低サイクル疲労挙動*

金澤健二**, 木村 恵**, 阿部孝行**, 植田勇夫***, 村松一浩***

Low-Cycle Fatigue Behavior of Spring Steels

Kenji KANAZAWA, Megumi KIMURA, Takayuki ABE,
Isao UEDA, and Kazuhiro MURAMATSU

Low-cycle fatigue tests were carried out on spring steels at room temperature under a triangular strain wave form to obtain basic information about low-cycle fatigue behavior of springs.

The results obtained are summarized as follows:

- (1) Cyclic softening behavior was observed under cyclic straining with plastic strain component.
- (2) Fatigue life properties and cyclic deformation properties of spring steel are the same as those which obtained by extrapolating properties of tempered steels for machine structural use to higher level of hardness.
- (3) Estimation method of low-cycle fatigue lives from tensile properties is proposed by modifying Manson's Universal Slope Method.
- (4) Total damage under incremental step tests becomes 1 to 1.8 at failure. Miner's cumulative rule is applicable to fatigue life estimation under straining of random amplitudes.
- (5) Total damage is very small compared with 1 at failure, when stress controlled fatigue tests are carried out after a part of strain controlled test with plastic strain component. Cyclic softening by strain cycling promotes fatigue damage due to stress cycling.

Key Words : Low-cycle fatigue, Cyclic softening, Cyclic stress strain curve, Cumulative damage, Spring steel

1. 緒 言

近年、自動車の軽量化の要求に伴い、その基本的構成部材の一つであるばねにおいても、設計の段階から高応力下での使用が想定されるようになってきた。さらに、実車においては、路面状況、急発進・急停車などにより過負荷が強いられることがある。このような状況において、ばねの低サイクル疲労に関する考え方を明らかにしておく必要が生じてきた。

これまでばねはもっぱら、低サイクル疲労などを想定しない条件下で使用されていたため、ばねに関する低サイクル疲労の研究はほとんどなされていなかった。そこで、本研究では、ばねの耐久性・信頼性を高める上で不可欠となってきた、ばねの低サイクル疲労に関する基本的考え方を明らかにするために、ばね鋼の低サイクル疲労特性について調べた。すなわち、熱処理により硬さレベルを変えたばね鋼を供試材とし、繰返し変形挙動と疲労寿命について調べた。また、比較的強度の高い機械構造用合金鋼の調質材などについては、すでに低サイクル疲労に関するデータも蓄積されているので^{1)~3)}、それらの結果との比較のもとに、ばね鋼の低サイクル疲労において特徴的な挙動があるのか検討した。

2. 供試材料

実験に供した材料はばね鋼 JIS SUP10 相当材で、その化学成分を Table 1 に示す。素材の形状は厚さ 23mm、幅 101mm の板状である。920℃25 分保持後油冷による焼入れを行い、その後 435℃、490℃、540℃で 90 分保持の焼戻し処理を施した。以後それぞれ A 材、B 材、C 材と呼ぶことにする。熱処理条件を Table 2 に示す。

熱処理後の機械的性質を Table 3 に示す。表には 3 回行

Table 1 Chemical composition(mass%).

C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V
0.52	0.24	0.85	0.015	0.014	0.13	0.95	0.16

Table 2 Heat treatments.

Quenching	Tempering	Symbol
920℃ 25min	435℃ 90min	A
	490℃ 90min	B
	540℃ 90min	C

原稿受付 1994年9月28日

* ばね技術研究会 1994年度秋季講演会にて発表

** 金属材料技術研究所 (National Research Institute for Metals)

*** (株)堀切バネ製作所 (Horikiri Spring MFG. Co., Ltd.)

った引張試験の平均値を示している。0.2%耐力，引張強度，硬さの高い材料ほど，伸び，絞りの値は低くなっている。

3. 試験方法

3.1 疲労試験機

疲労試験には，容量 200kN の電気油圧式サーボ疲労試験機を用いた。試験片の固定はロックナット方式によった。試験片は，直径 6 mm，長さ 12mm の平行部を有する中実丸棒で，軸方向は素材の圧延方向である。試験片表面の最終仕上げは，600 番紙やすりを用いた軸方向研磨によった。試験片形状を Fig. 1 に示す。

疲労試験は，試験片平行部に押し付けられた伸び計によって検出される軸方向のひずみを制御して行った。ひずみを検出する標点間距離は平行部内 10mm である。

3.2 疲労寿命特性試験

寿命試験は室温，大気中で行った。ひずみ波形は三角波とし，ひずみ速度は $1 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ となるようにした。全ひずみ振幅 ϵ_{ta} の目標値は 0.02，0.015，0.01，0.007，0.005 の 5 水準とした。

Fig. 2 に典型的な応力ひずみ曲線の模式図を示す。最大応力と最小応力の絶対値の 1/2 を応力振幅 σ_a とし，塑性ひずみ振幅 ϵ_{pa} は応力 0 のひずみ軸と交差する応力ひずみ曲線の幅の 1/2，また，弾性ひずみ振幅 ϵ_{ea} は全ひずみ振幅と塑性ひずみ振幅の差とした。

3.3 繰返し変形特性試験

繰返し応力ひずみ曲線の求め方としては，寿命試験の各試験における全ひずみ振幅と応力振幅の関係から求める多数試験片法や，1 本の試験片にひずみ振幅を漸増，漸減させ，そこから得られる全ひずみ振幅と応力振幅の関係から求めるインクレメンタルステップ法⁴⁾ などがある。ここでは，後者の方法による試験も行った。

インクレメンタルステップ法のひずみ波形を Fig. 3 に示す。試験は室温，大気中で行った。ひずみ波形は，1 ブロック当り 25 の三角波から構成され，最大の全ひずみ振幅を 0.02 とし，ひずみ振幅を直線的に増減させる波形とした。ひずみ速度は寿命試験と同じ $1 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ とした。

4. 試験結果

4.1 疲労寿命特性試験

本供試材料はいずれも，一定ひずみ振幅の繰返しにより，変形応力は次第に低下する繰返し軟化挙動を示す。繰返し

ϵ_{ta} : Total strain amplitude

ϵ_{pa} : Plastic strain amplitude

ϵ_{ea} : Elastic strain amplitude ($= \epsilon_{ta} - \epsilon_{pa}$)

Fig. 2 Typical stress-strain loop and definitions of strain and stress amplitude.

Table 3 Mechanical properties.

	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness HV
A	1501	1628	11.5	36.8	494
B	1368	1438	13.6	39.1	444
C	1198	1298	15.6	40.8	414

Fig. 1 Profile of specimen (mm)

Fig. 3 Strain waveform of incremental step test.

ひずみに伴う応力振幅の変化の例として、B材の結果を Fig. 4 に示す。ひずみ振幅が大きい条件ほど、繰返し初期の応力振幅の低下が著しい。

一定の全ひずみ振幅下でも、繰返し軟化に伴い塑性ひずみ振幅は漸増し、弾性ひずみ振幅は漸減する。このような場合、各試験における応力振幅、塑性ひずみ振幅、弾性ひずみ振幅の代表値としては、疲労寿命の約 1/2 におけるサイクルでの値を用いるのが一般的である。

Fig. 5 に塑性ひずみ振幅と応力振幅の関係を示す。強度の高い材料ほど、繰返し変形下での変形応力も高くなっている。両者の関係は

$$\sigma_a = C' \epsilon_{pa}^{n'} \quad \dots\dots\dots (1)$$

で表すことができる。

弾性ひずみ振幅と応力振幅の関係は縦弾性係数 E を介して

$$\sigma_a = E \epsilon_{ea} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Fig. 4 Change in the stress amplitude with increasing strain cycling.

Fig. 5 Relationship between the plastic strain amplitude and stress amplitude.

で近似的に表すことができるとすると、全ひずみ振幅と応力振幅の関係、いわゆる繰返し応力ひずみ曲線は

$$\begin{aligned} \epsilon_{ta} &= \epsilon_{ea} + \epsilon_{pa} \\ &= \sigma_a / E + (\sigma_a / C')^{1/n'} \quad \dots\dots\dots (3) \end{aligned}$$

で表される。

多数試験片法による繰返し応力ひずみ曲線を Fig. 6 に示す。図中の曲線は式 (3) によるが、ここで E は 200GPa とした。塑性ひずみ振幅 0.002 に対する応力振幅を繰返し 0.2% 耐力とすると、その値は図中に併せて示す引張試験における 0.2% 耐力より著しく低下していることがわかる。

全ひずみ、塑性ひずみ、弾性ひずみの各ひずみ振幅と疲労寿命の関係を材料別に Fig. 7 に示す。塑性ひずみ振幅と疲労寿命、弾性ひずみ振幅と疲労寿命の関係は一般に以下のような式で表示できると言われている。なお、強度の高い材料では、塑性ひずみ範囲の小さな領域においてこの関係からはずれる場合のあることも報告されている^{1), 2)}。

$$\epsilon_{pa} = C_p / N_f^{kp} \quad \dots\dots\dots (4)$$

$$\epsilon_{ea} = C_e / N_f^{ke} \quad \dots\dots\dots (5)$$

Fig. 7 に示すように、本供試材料の場合にも、強度の高い A 材の塑性ひずみ振幅の小さなデータを除き、式 (4), (5) で試験結果を表示することができる。また、Fig. 7 の全ひずみ振幅と疲労寿命の関係を表す曲線は式 (4), (5) を合成した以下の式によるものである。

Fig. 6 Cyclic stress-strain curves by companion specimen method.

(1) Material A

(2) Material B

(3) Material C

Fig. 7 Relationships between strain amplitudes and the number of cycles to failure.

$$\epsilon_{ta} = \epsilon_{pa} + \epsilon_{ea}$$

$$= C_p / N_f^{kp} + C_e / N_f^{ke} \dots \dots \dots (6)$$

材料間の相違は特に顕著に認められないが同一寿命に対する弾性ひずみ振幅は、強度の高い材料の方が高い値を示す傾向にある。

4.2 繰返し変形特性試験

インクレメンタルステップ法による応力ひずみ曲線の例として、1ブロック目と破断ブロック数の約1/2のブロック目における曲線を Fig. 8 に示す。1ブロック目においてさえ、ひずみ振幅が大きくなるにも拘らず応力振幅は小さくなる傾向が認められ、軟化の挙動がうかがえる。

インクレメンタルステップ法による繰返し応力ひずみ曲

Fig. 8 Examples of stress-strain curves of incremental step test.

線を Fig. 9 に示す。曲線は式 (3) によるものである。なお、塑性ひずみ振幅が小さな領域においては、式 (1) が成り立たないので、ここでは塑性ひずみ振幅の小さな領域のデータは除いて回帰した。Fig. 6 に示す多数試験片法による繰返し応力ひずみ曲線との比較において、特に両方法による結果の差は認められなかった。

4.3 疲労試験後の破面観察

疲労破面の走査型電子顕微鏡による観察例を B 材について Fig. 10 に示す。破面全体にわたり材料間で明瞭な相違は認められなかった。いずれも、疲労破壊起点部には欠陥の存在など特に異常はなく、中心部分では二次割れが、最終破壊部分にはデンプル状形態が観察された。

5. 考 察

5.1 繰返し軟化挙動

本供試材料は繰返しひずみにより応力振幅は低下し、繰返し軟化の挙動を示したが、実際に軟化していることを確認するため、疲労試験後の試験片平行部断面の硬さを調べた。

母材に比べ試験後の硬さはいずれも低下し、軟化していることが認められた。軟化の程度を硬さの比で表し、ひずみ振幅との関係を示したのが Fig. 11 である。繰返しひずみによる応力振幅の低下の割合は、ひずみ振幅の大きい条件

Fig. 9 Cyclic stress-strain curves by incremental step method.

(1) Feature of fracture surface

(2) Region of early stage of crack propagation

(3) Center of fracture surface

(4) Region of final stage of crack propagation

Material B, Total strain amplitude : 0.01

Fig. 10 Examples of SEM observation of fracture surface.

ほど顕著であったが、硬さの比においては特にはっきりしたひずみ振幅依存性は認められなかった。

強度の高い調質鋼における繰返しひずみにともなう軟化は、調質時に導入された密度の高い転位が、ひずみの繰返しにともない再配列し、安定した転位のセル構造を構成する過程に起こる現象と考えられている⁵⁾。本供試材料における繰返し軟化も同様な機構によるものと考えられる。

5.2 低サイクル疲労特性と素材の機械的性質との関係

ばね鋼の低サイクル疲労については発表されているデータは見受けられないので、ここではすでに報告されている比較的強度の高い機械構造用合金鋼の低サイクル疲労データ^{1)~3)}と本研究で得られた結果とを比較してみる。

Table 4 は本結果と、金属材料技術研究所における実用金属材料の疲労特性データシート作成活動の一環として公表されている、機械構造用合金鋼調質材の低サイクル疲労特性データをまとめたものである。クロム鋼、クロム・モリブデン鋼、ニッケル・クロム・モリブデン鋼について、3水準の焼戻し温度で強度レベルを変えた供試材料に対しての結果である。0.2%耐力、引張強度、破断延性の引張特性と、硬さ、インクレメンタルステップ法による繰返し0.2%耐力及び疲労寿命 10^3 サイクルに対する各ひずみ振幅を示している。なお、表中の*印は、データシートの付録には塑性ひずみ振幅の小さな領域で式(4)が成り立たないとして回帰結果が示されていないもので、ここでは直線関係が得られるひずみの大きい範囲のデータのみを用いて回帰した結果から得られた値を表している。また、表中の破断延性 ε_f は、絞り ϕ (%)と次式の関係にある。

$$\varepsilon_f = 1_n \{100 / (100 - \phi)\} \dots\dots\dots (7)$$

Fig. 12 は引張試験における0.2%耐力と繰返し0.2%耐力との関係を示したものである。引張試験における0.2%耐力が大きい材料ほど繰返し0.2%耐力も大きくなっており、両者の関係はほぼ1本の直線で表示できる。したがって、強度の高いばね鋼においても、合金鋼調質材と比べ、特に変

わった繰返し変形挙動を示すものではないといえる。

Fig. 13 は、Table 4 に示される疲労寿命 10^3 サイクルにおける弾性ひずみ振幅と引張強度との関係を示している。

Fig. 11 Relationships between the ratio of hardness and the total strain amplitude

Fig. 12 Relationships between the cyclic 0.2% proof stress and the 0.2% proof stress by tensile test.

Table 4 Comparison of present data with published data for tempered steels for machine structural use.

Material	Tempering temperature (°C)	0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Fracture ductility	HV	Cyclic 0.2% proof stress (MPa)	Strain amplitude for life of 10^3 cycles		
							ε_{pa}	ε_{ea}	ε_{ta}
Present material	435	1501	1628	0.459	494	974	0.0032	0.0058	0.0090
	490	1368	1438	0.469	444	892	0.0037	0.0054	0.0091
	540	1198	1298	0.524	414	899	0.0034	0.0052	0.0086
SCr440	550	903	1006	0.968	318	611	*0.0060	*0.0039	*0.0099
	600	805	921	1.050	292	567	*0.0058	*0.0037	*0.0095
	650	717	840	1.171	273	517	0.0055	0.0033	0.0088
SCM435	550	1017	1088	1.050	343	622	*0.0064	*0.0043	*0.0107
	600	893	978	1.109	316	579	*0.0070	*0.0040	*0.0110
	650	780	881	1.238	283	522	0.0074	0.0035	0.0109
SNCM439	580	1084	1146	0.892	357	742	0.0044	0.0046	0.0090
	630	953	1029	0.968	326	639	0.0043	0.0041	0.0084
	680	810	884	1.109	285	570	0.0048	0.0035	0.0083

Fig. 7 の説明においても触れたが、引張強度が高い材料ほど同一疲労寿命に対する弾性ひずみ振幅は大きくなっている。ばね鋼の結果は合金鋼調質材の結果の延長線上にあり、この関係においても、強度の高いばね鋼は、合金鋼調質材と比べ特に変わった挙動を示すものではないといえる。

Manson は幅広い金属材料を対象に、式 (4)、(5) における指数は材料に依存しない値として

$$k_p = 0.6, k_e = 0.12$$

係数は材料の機械的性質と関連して

$$C_p = 0.5 \varepsilon_f^{0.6}, C_e = 1.75 \sigma_B / E$$

となることを示した。そして、式 (4)、(5)、(6) は

$$\varepsilon_{pa} = 0.5 \varepsilon_f^{0.6} N_f^{-0.6} \dots\dots\dots (8)$$

$$\varepsilon_{ea} = \frac{1.75 \sigma_B}{E} N_f^{-0.12} \dots\dots\dots (9)$$

$$\varepsilon_{ta} = 0.5 \varepsilon_f^{0.6} N_f^{-0.6} + \frac{1.75 \sigma_B}{E} N_f^{-0.12} \dots\dots (10)$$

で表示できるという共通勾配法を提案している⁶⁾。

Fig. 13 の図中に示す直線は、式 (9) において、 $N_f = 10^3$ 、 $E = 200\text{GPa}$ として得られる直線である。合金鋼調質材を

Fig. 13 Relationships between the tensile strength and the elastic strain amplitude corresponding with fatigue life of 10^3 cycles.

Fig. 14 Relationships between the fracture ductility and the plastic strain amplitude corresponding with fatigue life of 10^3 cycles.

含め本供試材の結果は直線とほぼ一致している。しかし、合金鋼調質材やばね鋼に限るならば、指数 k_e の値は 0.12 ではやや大きく、平均的には約 0.085 となっている。そこで指数の修正とあわせ、係数も実験結果に合わせると式 (9) は

$$\varepsilon_{ea} = \frac{1.4 \sigma_B}{E} N_f^{-0.085} \dots\dots\dots (11)$$

となる。

Fig. 13 と同様に、Fig. 14 は Table 4 に示される疲労寿命 10^3 サイクルにおける塑性ひずみ振幅と破断延性との関係を示している。図中の直線は式 (8) において $N_f = 10^3$ として得られる直線である。実験点は直線の下側に大きく外れているが、破断延性依存性としては、合金鋼調質材とばね鋼の結果を合わせて式 (8) の関係とほぼ一致している。したがって、塑性ひずみ振幅と疲労寿命の関係の破断延性依存性においても、強度の高いばね鋼は、合金鋼調質材と比べ特に変わった特性を示すものではないといえる。合金鋼調質材やばね鋼においても、指数 k_p の値は約 0.6 となっている。そこで指数をそのままとし、係数を実験結果に合わせると式 (8) は

$$\varepsilon_{pa} = 0.32 \varepsilon_f^{0.6} N_f^{-0.6} \dots\dots\dots (12)$$

となる。

弾性ひずみ振幅を $1.4 \sigma_B / E$ で、塑性ひずみ振幅を $0.32 \varepsilon_f^{0.6}$ で除して疲労寿命との関係を両対数図上に示すならば、式 (11)、(12) より、それぞれ (0, 1) の点を通り、傾きが -0.085 と -0.6 の直線のまわりに実験点はプロットされることになる。Fig. 15 はこの関係を示した図である。弾性ひずみ振幅と疲労寿命の結果に関しては式 (11) でよく表示できることがわかる。一方、塑性ひずみ振幅に関しては式 (12) ではややばらつきの大きな結果になっているが、寿命に関しては factor of 2、ひずみに関しては factor of 1.5 を許容するのであれば、塑性ひずみ振幅と疲労寿命の関係を推定することができる。

Manson の式 (10) の共通勾配法や、ばね鋼や合金鋼調

Fig. 15 Relationships between strain amplitudes normalized by tensile properties and the number of cycles to failure.

質材などに限って求めた式 (11), (12) からすると, 全ひずみ振幅に占める塑性ひずみ振幅の割合が大きな高ひずみ領域では延性の高い材料が, 弾性ひずみ振幅の割合が大きな低ひずみ領域では強度の高い材料が疲労寿命が大きくなる。このような傾向にあることは, 硬さレベルを変えた SAE 1045 材の結果においても指摘されている⁷⁾。一般的には強度の高い材料は延性が低いので, 弾性ひずみ振幅と塑性ひずみ振幅とがほぼ等しいひずみ振幅の領域では鋼種による疲労寿命の差は大きくない。したがって, ばね鋼を含め強度の高い鋼の低サイクル疲労寿命特性を向上させるには, 強度と延性を共に高める必要があることがわかる。しかし, Table 3 にも示されるように, 一般的には, 強度の高い材料の延性は低くなるので, このような材料を開発することは極めて困難なことと言える。

5.3 さらに強度の高いばね鋼の低サイクル疲労寿命の推定と検証

ばね鋼の低サイクル疲労挙動は一般の合金鋼調質材の低サイクル疲労挙動と特に相違はなく, ばね鋼の低サイクル疲労寿命も引張強度, 破断延性などの機械的性質から推定できることを示した。

ばね鋼においてどの程度の強度レベルの材料まで式 (11), (12) で疲労寿命を予測することができるのか興味ある問題である。そこでここでは Table 5 に示すように, 本供試材料と同じ SUP10 相当材で, 硬さレベルを HV550 と高くした材料について, 低サイクル疲労寿命を推定し, 一部疲労試験を行い, 推定結果を検証した。

Fig. 16 は Table 5 に示すばね鋼の推定疲労寿命曲線と検証試験の結果である。弾性ひずみ振幅と疲労寿命の関係の推定線は, 検証試験結果とよく一致するようであるが, 一方, 塑性ひずみ振幅と疲労寿命の関係の推定線は, 検証結果と一致していない。推定線に対し実際の寿命が factor of 2 の範囲に分布することを考え合わせても, 検証結果は分布の下限をやや下まわっている。

検証試験により得られた破面の例を Fig. 17 に示す。Fig. 13 に示す硬さレベル HV500 までのばね鋼の結果と明瞭な相違が認められ, 粒界破壊が支配的な様相を示している。検証試験において疲労寿命が機械的性質から推定した値より低くなったのは, 粒界破壊など破壊形態が変わったことによるものと考えられる。

硬さレベルが HV550 と高いばね鋼でも, 粒界破壊など特異な破壊形態が起こらなければ, 式 (11), (12) で疲労寿命を推定できるのではないと思われる。

5.4 変位制御, 荷重制御下の疲労損傷の蓄積

合金鋼調質材やばね鋼などの強度の高い鋼は, 塑性変形の繰返しにより軟化する。このように軟化した状態で荷重制御下での繰返し応力を受けるならば, 塑性変形の繰返しを受けずに軟化していない材料に比べ, 疲労寿命, 疲労強度は低下することが予想される。すなわち, 塑性変形の繰返しなどを受けることはない想定して設計されたばねに対して, 何等かの過大荷重で繰返し塑性変形が与えられる

と, その後の繰返し応力により疲労破壊は容易に起こることが懸念される。

そこで, 本節では変位制御下及び荷重制御下での疲労損傷の蓄積について, マイナー則を基に検討する。

3.3 節で述べたインクレメンタルステップ法による繰返し変形特性試験は, 見方を変えると変動ひずみ下の疲労寿命試験にも相当する。そこでインクレメンタルステップ法による破断時はどのような累積損傷状態にあるのか調べた。各ひずみ振幅に対する疲労寿命は式 (6) より推定し, 1 ブロック当りの損傷量と破断時の全損傷量を算出した。その結果を Table 6 に示す。破断時の全損傷量は 1~1.8 で, 変動するひずみ振幅を受ける場合の疲労寿命はマイナー則にはほぼ準じていることがわかる。

次に, A 材, C 材について, 以下のような変位制御-荷重制御の組合せ試験を行い, 破断時の損傷量を評価した。先ず予め荷重制御のもとで破断までの連続試験を行った。疲

Table 5 Material for verification test of fatigue life estimation.

Chemical composition (mass%)							
C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V
0.52	0.24	0.86	0.017	0.012	0.15	0.95	0.16
Heat treatments							
Quenching				Tempering			
920°C 25min				390°C 90min			
Mechanical properties							
0.2% proof stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)	Hardness HV			
1590	1716	9.9	33.5	547

Fig. 16 Relationships between strain amplitudes and the number of cycles to failure for verification test.

労限 σ_u の目安を 1.7HV とし⁸⁾、設定応力振幅 $1.1\sigma_u$ のもとでの破断繰返し数 N_{LF} を求めた。変位制御-荷重制御組合せ試験は、初めに変位制御試験として、全ひずみ振幅 0.02 (そこでの疲労寿命を N_{DF} とする。) のもとで損傷量が約 0.1 となるような繰返し数 N_{DC} を与え、次いで設定応力振幅 $1.1\sigma_u$ のもとで荷重制御試験を破断まで行い、破断繰返し数 N_{LC} を求めた。変位制御下での損傷 $D_D (= N_{DC} / N_{DF})$ と荷重制御下での損傷 $D_L (= N_{LC} / N_{LF})$ の和として破断時の全損傷とした。これらの結果を Table 7 に示す。両材料とも破断時の全損傷は 0.2 以下と非常に小さな値になっており、特に荷重制御下での試験は損傷が 0.1 以下であるにもかかわらず破断に至っていることがわかる。

変位制御下での変動ひずみ試験では累積損傷がほぼ 1 の

Table 6 Application of cumulative damage rule to data obtained by incremental step tests.

Material	A	B	C
Damage per one block	0.0766	0.0765	0.0999
Number of blocks to failure	23	14	10
Total damage at failure	1.762	1.071	0.999

時点で破断するが、変位制御の試験の後、荷重制御の試験を行うと累積損傷が極端に小さな値でも破断する。これは、繰返し塑性変形により軟化した状態は、その後の荷重制御下の疲労に対しては破壊が容易になるとの予想と一致するものである。

疲労強度を高めるために施すショットピーニングによる圧縮の残留応力も、塑性変形が繰返し与えられると緩和することも考えられるので、ばねに対して塑性変形が繰返し与えられるということは致命的である。したがってばねにおいては、路面状況、急発進・急停車などにより過負荷が強いられることがあっても、決して塑性変形が繰返し与えられることのない構造にするなどの対応が必要である。

6. 結 言

硬さレベル HV410~510 のばね鋼 SUP10 相当材について、ひずみ制御の低サイクル疲労特性を調べ、以下のことがわかった。

- (1) 塑性ひずみの繰返しにより変形応力は低下し、繰返し軟化挙動を示す。
- (2) 塑性ひずみ振幅の小さな領域を除き、塑性ひずみ振幅と破断繰返し数、弾性ひずみ振幅と破断繰返し数は、いずれも両対数表示で直線関係にあった。
- (3) 繰返し変形特性、疲労寿命特性とも、これまでに報告

(1) Feature of fracture surface

(2) Region of early stage of crack propagation

(3) Center of fracture surface

(4) Region of final stage of crack propagation

Total strain amplitude : 0.01

Fig. 17 SEM observation of fracture by verification test.

されている硬さレベル HV270~360 の機械構造用合金鋼調質材の特性を高強度側に外挿することにより予想される傾向とほぼ一致した。

(4) Manson の共通勾配法を一部修正して、機械的性質から

Table 7 Results of strain-and stress-controlled combined tests.

Material		A	C
Stress controlled test			
	Hardness(HV)	494	414
	Endurance limit estimated: $\sigma_u = 1.7HV$ (MPa)	840	705
	Stress amplitude $1.1\sigma_u$ (MPa)	925	775
	Number of cycles to failure: N_{LF}	33724	46834
Strain- and Stress-controlled combined test			
Strain controlled test	Total strain amplitude	0.02	0.02
	Fatigue life estimated: N_{DF}	119	76
	Number of cycles at interruption: N_{DC}	12	8
	Damage: $D_D = N_{DC} / N_{DF}$	0.101	0.105
Stress controlled test	Stress amplitude $1.1\sigma_u$ (MPa)	925	775
	Number of cycles to failure: N_{LC}	2496	4148
	Damage: $D_L = N_{LC} / N_{LF}$	0.074	0.089
	Total damage at failure: $D_D + D_L$	0.175	0.194

低サイクル疲労寿命を推定する方法を提案した。

(5) 硬さレベル HV550 のばね鋼に対して提案の方法を適用したところ、破壊形態が粒界破壊に変化したことにより、実際の疲労寿命は推定寿命曲線より低くなった。

(6) インクレメンタルステップ法による繰返し変形特性試験の破断データに、累積損傷則を適用した結果、破断時の全損傷は 1~1.8 となった。ひずみ振幅が変動する条件では、マイナー則が成り立つものと思われる。

(7) 変位制御の試験を一部行い、引続き荷重制御の試験を破断まで行ったところ、破断時の全損傷は 1 よりもかなり小さくなった。ひずみの繰返しにより軟化した状態では、繰返し応力により損傷が加速することを意味している。

(8) ばねにおいては、路面状況、急発進・急停車などにより過負荷が強えられることがあっても、決して塑性変形が繰返し与えられることのない構造にするなどの対応が必要である。

参考文献

- 1) 金材技研, NRIM Fatigue Data Sheet No.45 (1985).
- 2) 金材技研, NRIM Fatigue Data Sheet No.52 (1986).
- 3) 金材技研, NRIM Fatigue Data Sheet No.56 (1987).
- 4) Landgraf, R. W., Morrow, J. and Endo, T., J. Materials, 4 (1969), 176.
- 5) Kanazawa, K., Yamaguchi, K. and Kobayashi, K., Mat. Sci. Eng., 40 (1979), 89.
- 6) Manson, S. S., Exper. Mechanics, 5 (1965), 193.
- 7) Seshadri, T. V. and Pierce, P. R., SAE/SP-79/448/790889, (1979).
- 8) 西島ほか, 金材技研疲労データシート資料 No.5 (1989).