高強度ばね鋼の大気中および腐食環境下でのねじり疲労強度に 及ぼすショットピーニングの影響†

脇田 将見* 久野 隆紀** 長谷川 智也***
猿木 勝司**** 田中 啓介*****

Effect of Shot Peening on Torsional Fatigue Strength of High Strength Spring Steel in Air and Corrosive Environments

by

Masami WAKITA*, Takanori KUNO**, Tomoya HASEGAWA***,
Katsushi SARUKI**** and Keisuke TANAKA*****

Torsional fatigue tests were conducted for a spring steel, SUP7, with Vickers hardness of 480. The effect of shot peening on the torsional fatigue strength of smooth and artificially notched specimens in the corrosive environment and air was studied. The increase of the fatigue strength of smooth specimens in air by shot peening was relatively small, and the surface roughness due to peening did not reduced the fatigue strength. On the other hand, the fatigue strength of notched specimens increased greatly by shot peening and the notch sensitivity was reduced. In corrosion fatigue, the fatigue strength increased by shot peening in the medium life range. The strength of shot-peened specimens was reduced in the long life range around 10^7 cycles and was approached to that of not-peened specimens. A similar improvement was observed for notched specimens in the medium life range, and the notch sensitivity was reduced by shot peening. The compression zone made by shot peening extended about 0.3mm below the surface, and relaxed by fatigue loading. The observation results on the cracking behavior and residual stress distribution were used to interpret the effect of shot peening on the fatigue strength of spring steel.

Key words: Torsional fatigue, Spring steel, Shot peening, Corrosive environment, S-N curve

1 緒 言

自動車の燃費向上のため、自動車サスペンション用懸架コイルばねの軽量化の取組みがなされ、ばね鋼の高強度化やショットピーニングによる疲労強度向上が図られている。¹⁾筆者等はこれまでにコイルばねの軽量化の取り組みとして、腐食疲労強度の向上を重視した高強度ばねの開発²⁾や高腐食疲労強度を有するばね用鋼の冷間コイルばねへの適用³⁾を行ってきた。

また、コイルばねは跳ね石や腐食などの環境下で主としてねじり応力を受けるため、材料欠陥および環境を考慮したねじり疲労強度が重要となる。そこで、筆者らは前報⁴⁾において高強度ばね鋼に対して、ねじり疲労試験を平滑材、人工ビット材の2種類の試験片に対して大気中および5%NaCl水溶液中に行い、ねじり疲労強度に及ぼす欠陥および腐食環境の影響について検討した。また、これらの疲労強度への影響を材料の硬さの関数として表す実験式を提案した。⁵⁾

一方、ばねの高強度化の手段としてショットピーニングがよく知られており、疲労強度に関する研究も多く発表されている。しかしながら、従来の研究は平面曲げ疲労あるいは回転曲げ疲労であり^{6), 7)}ばね鋼のねじり疲労強度の報告は少なく^{8), 9)}切欠き材における腐食環境下でのねじり疲労強度に及ぼすショットピーニングの効果についてはほとんど研究がなされていない。

本研究では、ばね鋼 (JIS SUP7) を熱処理によりビッカース硬さを480HVに調整した材料を用いて、ショットピーニングを施した平滑材と人工ビットを有する試験片の大気中および塩水腐食環境下におけるねじり疲労強度を求め、前報⁴⁾のショットピーニングを施していない無施行材の場合と比較することから、これらのねじり疲労強度に及ぼすショットピーニングの効果について検討した。さらに、疲労き裂形状および破面の微視的様相の観察、および残留応力分布のX線測定をもとにショットピーニングによる強度向上の機構について検討した。

† 原稿受理 平成 19 年 9 月 25 日 Received Sep. 25, 2007 ©2008 The Society of Materials Science, Japan

* 正 会 員 中央発條㈱ 〒470-0225 愛知県西加茂郡三好町, Chuo Spring Co., Ltd., Nishikamo-gun, Aichi, 470-0225

** 中央発條㈱ 〒470-0225 愛知県西加茂郡三好町, Chuo Spring Co., Ltd., Nishikamo-gun, Aichi, 470-0225

*** 名城大学理工学部材料機能工学科 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口, Dept. of Material Sci. & Eng., Faculty of Sci. & Tech., Meijo Univ., Tenpaku-ku, Nagoya, 468-8502

**** 正 会 員 名城大学理工学部材料機能工学科 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口, Dept. of Material Sci. & Eng., Faculty of Sci. & Tech., Meijo Univ., Tenpaku-ku, Nagoya, 468-8502

***** 正 会 員 名城大学理工学部機械システム工学科 〒468-8502 名古屋市天白区塩釜口, Dept. of Mech. Eng., Meijo Univ., Tenpaku-ku, Nagoya, 468-8502

2 実験方法

2・1 材料および試験片

実験に用いた材料は自動車用コイルばねに使用されている熱間成形用ばね鋼 (JIS SUP7) の量産実炉溶解材で、前報⁴⁾と同一材料である。その化学成分は C 0.6, Si 2.0, Mn 0.9, P 0.014, S 0.019 (mass%) である。試験片は機械加工による粗加工の後に、1173K で 20min の加熱後油中に焼入れし、723K で 60min の焼戻しを行った後水冷し、硬さ 480HV にした。この硬さは一般に用いられる実用ばねの硬さレベルである (JIS B2704)。試験片の引張強さを SAE J417 による硬さからの換算をすると 1620MPa となる。

試験片は調質処理の後、最終試験片形状に加工し、その後エメリー紙により #400 から #2000 まで順次研磨仕上げをした。最終の研磨方向は軸方向に平行となるようにした。また、仕上げ後研磨による圧縮残留応力を低減する目的で、Ar ガス中で温度 673K において 60min の焼なましを行った。試験片形状は前報と同一で、平行部は直径 7.2mm で、長さ 10mm である。その後にショットピーニングを施工したが、投射材として直径 0.8mm のカットワイヤーを用いて Table 1 に示す条件で行った。投射材は JIS B 2711 で自動車懸架用コイルばねに行なう普通ピーニングと同等のものである。なお、ショットピーニングを施行した平滑材については施行のままとショットピーニングによる表面粗さの影響を除去する目的で表面層を 0.1mm 以内で電解研磨により除去したものも準備した。以下では、ショットピーニングを施した試験片を施行材 (SP 材)、前報⁴⁾のショットピーニングを施していない材料を無施行材 (non-SP 材) と称する。人工ピットはショットピーニング後に導入した。試験片平行部中心の表面に電解研磨装置 (株リガク製) を使用し、電解液として塩化アンモニウム水溶液を用いて直径 600 μ m、深さ 300 μ m の半球状の穴をつけた。この人工ピットの寸法は、実用されている懸架ばねに測定されるピットの最大寸法を想定したものである。¹⁰⁾なお、このピットによるねじり負荷における垂直応力 (主応力) の応力集中係数は、有限要素法解析によると 2.2 である。⁵⁾

2・2 試験片の表面状態および金属組織

ショットピーニング施行材の試験片表面の走査型電子顕微鏡写真を Fig. 1 (a) に、表面下の断面の 3% ナイタル液によるエッチング後の金属微視組織を Fig. 1 (b) に示す。ショットピーニング施行材では表面の凹凸と表面の被さり状の欠陥が見られた。平滑材、ショットピーニン

Fig. 1 Micrographs of surface and cross section of shot-peened specimens.

グ施行材、ショットピーニング後表面研磨材の表面の十点平均粗さ R_z はそれぞれ 2.00, 15.84, 2.50 μ m であった。ショットピーニング施行材では表面層にショットピーニング加工による 10 から 20 μ m 程度の加工変質層が見られた。

2・3 硬さ分布

平滑材のショットピーニング施行材の表面直下のビッカース硬さ分布を Fig. 2 に示す。ショットピーニング施行による表層部の加工硬化により硬さは上昇しているが、その程度は小さく 20HV 程度である。

2・4 残留応力分布

試験片製作後の残留応力を X 線回折法によって、軸方向、45° 方向、および円周方向の応力を測定した。測定は標準 (JSMS-SD-5-02) に乗っ取り Cr-K α を利用して $\sin^2\psi$ 法で行った。残留応力の深さ方向の分布を測定するため試験片測定部の表面に電解研磨装置 (株リガク製) を使用し、電解液として塩化アンモニウム水溶液を用いて表層部を電解研磨し、表面から内部へ測定深さを変化させて測定した。なお、測定は $\square$ 2mm の窓状の部分のみを電解研磨により除去するウィンドウ法を用い、コリメーター径 1mm を使用した。ショットピーニング被加工面積に対し本ウィンドウの面積は 5% 程度と小さい為、測定値の補正は行わず、測定値のままとした。

Fig. 3 に無施行材と施行材の残留応力分布を示す。残留応力はいずれの場合も応力方向には依存せず等 2 軸応力である。無施行材では表面においては圧縮残留応力で -350MPa 程度であり、表面からの深さ 0.05mm で 0 となった。一方、施行材では表面においては圧縮残留応力で -800MPa 程度であり、表面からの深さ 0.2mm まで

Table 1 Shot-peening condition.

Peening machine	Impeller type
Shot diameter	0.8 mm
Shot hardness	600 HV
Verocity	70 m/s
Coverage	300 %
Arc height	0.557 mmA

Fig. 2 Hardness distribution beneath the surface of shot-peened specimens.

Fig. 3 Distribution of residual stress beneath the surface of shot-peened and not-shot-peened specimens.

-800MPa から-1000MPa 程度の値を維持し、0.3mm を超えた深さで-200MPa となり、ほぼ減衰している。

2・5 ねじり疲労試験

実験はシェンク式繰返しねじり・曲げ試験機 (JT トーション株式会社製 FTS-100, 能力 100N・m) を用いて、応力波形は正弦波の完全両振りで応力比-1 とした。周波数 30Hz である。腐食環境下での試験は、塩水噴霧装置 (スガ試験機株式会社製) によって、平滑材は平行部を、また人工ピットを有する場合は人工ピット部のみを 16h 腐食させた。腐食液は自動車用懸架ばねの腐食疲労試験で多く用いられる 5%NaCl 水溶液とした (JASO C604)。その後、試験片を塩水噴霧装置から取り出し、水洗、乾燥させた後、5%NaCl 水溶液を含ませた脱脂綿で塩水腐食させた部分を覆い、その周りをエチレンラップで包み乾燥を防ぎ、疲労試験を行った。また、疲労試験では、 10^7 回の繰返し数を打ちきりとした。

3 実験結果

3・1 S-N 曲線

施行材の S-N 曲線を、前報⁴⁾で報告した無施行材の結果と比較して Fig. 4 に示す。それぞれ (a) 大気中での平滑材、(b) 人工ピットあり、および (c) 腐食環境下における平滑材、(d) 人工ピットの 4 種類の疲労試験で得られた結果である。ここで、縦軸は丸棒のねじりモーメントをピットのない領域での断面係数で割った表面せん断応力振幅である。

Fig. 4 (a) と (b) の大気中の平滑材と人工ピット材では、S-N 曲線の折れ曲がり点は 10^5 から 10^6 の間に有り、 10^7 回時間強度は疲労限度に対応する。一方、Fig. 4 (c) と (d) の腐食環境下での S-N 曲線では水平部はみられず強度低下しているが、ここでは 10^7 回時間強度を疲労限度と称する。それぞれの場合の特徴は以下の通りである。

Fig. 4 (a) の大気中での平滑材については、施行材の S-N 曲線は、無施行材の場合より、ほぼ平行に上方に移動するが、その量は大きくない。本材料では、ショットピーニングによる硬さの増大は小さいが、表面の圧縮残留応力による疲労強度向上の効果が期待される。しかし、

(a) Smooth specimen under fatigue in air

(b) Notched specimen under fatigue in air

(c) Smooth specimen under corrosion fatigue

(d) Notched specimen under corrosion fatigue

Fig. 4 S-N diagrams.

Fig. 1 に示したように表面の状態が荒らされ、十点平均粗さ R_a が平滑材の $2\mu\text{m}$ から施行材の約 $16\mu\text{m}$ と大きくなるため、疲労強度を低下させる要因になることが予想される。一般に、ショットピーニングによる疲労強度の向上は表面の圧縮残留応力と、材料の加工硬化による硬さの増大に起因するとされ、逆に表面粗さの増加は疲労強度を低下させるとされている。⁸⁾そこで、ショットピーニング面を約 0.1mm 程度を電解研磨した電解研磨材に対しても疲労試験を行った。その結果も図中に示すが、電解研磨材の疲労強度の向上はほとんど認められない。すなわち、表面粗さの疲労強度に及ぼす影響はほとんどない。疲労強度の向上が小さい理由として、後述のように疲労試験により圧縮残留応力が減衰するためと考えられる。

次に Fig. 4 (b) に示す大気中での人工ピット材の場合には、施行材の S-N 曲線は無施行材より大きく上昇しており、ほぼ平行である。ここで各寿命 N_f での切欠き係数 β を次式で定義する。

$$\beta = \tau_{wo}(N_f) / \tau_w(N_f) \quad (1)$$

ただし、 $\tau_{wo}(N_f)$ は平滑材の寿命 N_f に対応する応力振幅、 $\tau_w(N_f)$ は人工ピット材の寿命 N_f に対応する応力振幅である。疲労限度に対する切欠き係数は、無施行材では約 1.7 であるものが⁴⁾施行材では約 1.2 となっており、切欠き感度がショットピーニングによって緩和される。

一方、Fig. 4 (c) の腐食環境下での平滑材の S-N 曲線において、短寿命側においては施行材と無施行材との疲労強度の差は小さく、(a) の大気中の疲労の短寿命の場合に近く、腐食の影響は大きくない。しかし、 10^6 回程度の寿命領域ではショットピーニングによる疲労強度の上昇が大きい。しかし、長寿命の 10^7 回近傍では急激に施行材の強度が小さくなり、無施行材に近づく。

Fig. 4 (d) の腐食環境下での人工ピット材の場合には、平滑材の場合と同様の傾向が認められ、中間寿命域においてショットピーニングによる強度上昇が大きい。ここで、 $N_f = 3 \times 10^5$ における切欠き係数を、式 (1) より求め

Fig. 5 S-N diagrams of shot-peened specimens.

β' とすると、無施行材の場合 2.0 で⁴⁾施行材の場合 1.4 となり、大気中と同様に切欠きの影響がショットピーニングによって緩和されている。

Fig. 5 には、施行材について平滑、切欠きの S-N 曲線を大気中と腐食環境中を同じ図に示す。平滑材、切欠き材ともに 3×10^5 回程度まで大気中と腐食環境下の差はあまり無いが、大気中では 4×10^5 回程度で疲労限度が現れるのに対し、腐食環境下での疲労強度は低下を続け、 10^7 回近くで急激に低下する。一方、無施行材の場合には腐食環境による強度低下は、前報⁴⁾で示したように寿命が 10^5 回以下の短寿命においても現れる。このように環境による強度低下がショットピーニングによって抑制される。

3・2 き裂の表面および破面観察

Fig. 6 にショットピーニング施行材の平滑材、人工ピット材の、大気中および腐食環境下のそれぞれ 4 種類の試験において寿命が $N_f = 3 \times 10^5$ 付近の破面を代表例として示す。いずれも上段の写真の水平方向が試験片の軸方向である。

Fig. 6 (a) の大気中疲労の平滑材の場合、破壊は表面から軸線に 45° 方向（主応力方向）に初期き裂が発生し、破壊した。前報⁴⁾の無施行材の場合にはき裂は発生点で

Fig. 6 Fractographs of shot-peened specimens.

(a) Surface of fracture origin

(b) Fracture origin

Fig. 7 Micrograph of corrosion pits of without shot-peened specimens.
($\tau_a = 350\text{MPa}$, $N_f = 4.9 \times 10^5$)

(a) Surface of fracture origin

(b) Fracture origin

Fig. 8 Micrograph of corrosion pits of shot-peened specimen.
($\tau_a = 350\text{MPa}$, $N_f = 4.9 \times 10^5$)

(a) $\tau_a = 500\text{MPa}$, $N_f = 7.4 \times 10^5$ (b) $\tau_a = 400\text{MPa}$, $N_f = 4.5 \times 10^6$

Fig. 9 Micrograph of corrosion pits of shot-peened specimen.

はせん断方向に初期き裂ができ、その後主応力方向に破壊した。施行材では、ショットピーニングにより表面に微細な欠陥が導入され、その一つが応力集中部となり疲労の起点となったと考えられる。高応力では主き裂以外にも2次き裂が認められたが、低応力では認められなかった。また、大気疲労の場合、ショットピーニングの有無に関らず疲労限度の試験片には停留き裂は見られなかった。一方、高橋ら⁷⁾は、硬さがHV = 570のばね鋼 (SUP9A) のショットピーニング施行材において、平面曲げ疲労限度近傍で 10^7 回で破断しなかった試験片では、停留き裂が認められたことを報告しているが、本研究のショットピーニング施行材について、 10^7 回まで破断しなかった平滑材および切欠き試験片を、553Kで加熱着色した後に、やや大きな応力振幅で破断試験下が、破面には着色されたき裂面は観察されず、停留き裂は確認されなかった。停留き裂の存在有無は、材料、ショットピーニング条件、荷重形式に依存するものと考えられ、今後の系統的な検討が必要である。

つぎに、Fig. 6 (b)の大気疲労の人工ピット材の場合では人工ピット部から主応力方向に初期き裂が発生している。無施行材の場合と同様である。また、人工ピット材においても疲労限度での停留き裂は認められなかった。

一方、腐食環境中の Fig. 6 (c)平滑材および (d) の人工ピット材ともに、表面の微小割れから主応力方向にき裂が進展しているが、この様相は無施行材と異なる。施行材では主き裂に垂直な2次割れを伴った領域が、表面あるいはピット周囲に渡って認められる。この点について次に検討する。

Fig. 7 には無施行材の破壊起点付近の SEM 写真を示す。破壊起点にはピットが存在する。次に、施行材の起

点付近の SEM 写真をせん断応力振幅 $\tau_a = 325\text{MPa}$ の場合について拡大写真を Fig. 8 に示す。試験片表面では多くの微小割れが形成され、破面でも表面から 0.3mm 程度の領域には2次割れが多くみられる領域が存在する。Fig. 9 には異なる応力振幅 $\tau_a = 500\text{MPa}$ および 400MPa での破面を示すが、振幅が高くなると微小割れの領域の深さは浅くなる。

ここで、微小割れ領域の平均的な深さを測定し、それから次の細長い表面き裂に対する村上の式を用いて応力拡大係数を算出した¹¹⁾

$$\Delta K = 0.65 \sigma_a \sqrt{\pi \sqrt{10} c} \quad (2)$$

ここで、 c が微小割れ領域の深さ、 σ_a は主応力振幅であるが、せん断応力振幅に等しい。Table 2 に結果をまとめるが、応力拡大係数は $13 \sim 15\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ 程度である。一方、前報⁴⁾で述べたように無施行材における腐食ピットに対する応力拡大係数は応力振幅によらずほぼ一定 $2 \sim 3\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$ で、この値になるとき裂として進展するものと考えられた。ショットピーニング施行材では、応力拡大係数が5倍程度に大きい。これは表面の圧縮残留応力のためにき裂としての内部方向への進展が阻止され、この間に表面に多数の微小割れが形成され、合体してかなり深

Table 2 Microcrack layer for shot-peened specimens in corrosion fatigue.

Stress amplitude τ_a (MPa)	Layer depth c (mm)	Stress intensity factor ΔK ($\text{MPa} \sqrt{\text{m}}$)
325	0.36	12.67
400	0.30	14.19
500	0.22	15.19

くなって初めて主き裂として進展するものと考えられる。しかし、微小割れの深さとショットピーニングによる圧縮残留応力の深さとの関係や疲労強度との関係は必ずしも明確になっておらず、今後の課題である。

つぎに、無施行材と施行材の腐食疲労した平滑材の表面のき裂の状態を Fig. 10 に示す。ここで、 10^7 回で破断しなかった試験片の表面と疲労限度以上の応力で破断した材料の破断面より離れた平行部の表面を示した。試験片の軸方向は水平方向である。それぞれ、図の左側が低倍率、右側が高倍率の写真である。Fig. 10 (b) から (d) では表面には主応力方向に互いに交差する微小割れが多数認められ、Fig. 10 (a) にも高倍率の写真に数 μm の微小割れが幾つか認められる。また、応力振幅が大きい方がき裂の密度が大きくなる。同一応力振幅 400MPa で比較すると、寿命は施行材の方長く、き裂密度も大きくなり、連結も進んでいる。特に、施行材では、微小割れが密集して形成される傾向がある。無施行材では、腐食ピットから形成されたき裂の 1 つが主き裂として優先的に成

長して破壊に至るが、施行材では、き裂の進展が圧縮残留応力場によって阻止され、多数のき裂がつながり、破面でみた微小割れ領域を形成するものと考えられる。

また、施行材の人工ピット材の疲労限度近傍の腐食疲労試験後の表面を観察した結果を Fig. 11 に示す。人工ピットの穴表面および人工ピット以外の平滑部表面に無数の微小割れが見られた。また、無施行材では全て人工ピットを起点とした破壊であったのに対し、施行材人工ピット以外の平滑部で破壊した場合が、特に 10^7 回近傍の長寿命において認められた。これらは腐食疲労において長寿命側で疲労強度が大きく低下し、平滑材と人工ピット材の疲労強度が同程度になることに対応する。

3・3 疲労による残留応力の変化

施行材および無施行材の疲労試験後に X 線測定した残留応力の表面下の分布を Fig. 12 に示す。ここで、疲労限度近傍に関しては、平滑材の大気中および腐食環境下での 10^7 回試験終了後、人工ピット材の大気中疲労の 10^7 回試験終了後を示す。また、有限寿命に関しては、平滑材の腐食疲労での $N_f = 6.9 \times 10^4$ 回破断材、 $N_f = 7.4 \times 10^5$ 回破断材、および $N_f = 7.7 \times 10^6$ 回破断材のそれぞれの試験後の平行部について測定した、 45° 方向残留応力を示す。特徴は次のようにまとめられる。

まず、残留応力は疲労限度近傍の応力でも疲労後に減衰する。試験前に等 2 軸であった残留応力は減衰後は、軸方向、 45° 方向、円周方向と減衰の程度が大きくなる傾向もあるがその差は大きくない。表面の 0.05mm 程度以下の深さの領域は、腐食疲労では -100MPa 以下となり、零に近くなるが、大気中の疲労では -400 から -600MPa 程度の圧縮残留応力が残留している。これは、腐食疲労では、前述のように表面に微小なき裂が多数形成されるため表面残留応力が解放されたためと考えられる。一方、表面からの深さ 0.1 から 0.2mm の領域は、試験環境には依存せず負荷された応力振幅が大きい方が圧縮残留応力の減衰は大きく、振幅 310MPa では減衰はほとんどなく、 637MPa では -200MPa 以下になる。一方、無施行材の残留応力は疲労試験後も試験前と同程度で表面残留応力は -350MPa であった。

3・4 ショットピーニングの疲労強度への影響

大気疲労に対する S-N 線図では、折れ曲がり点が $10^5 \sim 10^6$ 回に現れ、疲労限度が存在する。ここで、疲労限度と残留応力の関係を修正 Goodman 線図を基に検討する。通常ねじり疲労限度は、軸方向の静的応力が引張りの場

Fig. 10 Surfaces of corrosion fatigue test.

Fig. 11 Surface of shot-peened specimen of notched corrosion fatigue test. ($\tau_a = 150\text{MPa}$, $N_f \geq 10^7$)

Fig. 12 Distribution of residual stress after fatigue test of shot-peened specimens and without shot-peened specimens.

合には低下し、圧縮の場合には上昇することは知られている。¹²⁾McDiarmid は¹³⁾せん断応力が最大の面がクリティカルとなり、その面の垂直応力の最大値が影響するとして、次の損傷パラメータを提案した。

$$\tau_a + \sigma_{nmax} = f \quad (3)$$

ここで、繰返しねじりが作用しないときには垂直応力が破断応力 σ_B のとき破断すると考えると、次式に変形される。

$$\tau_a = \tau_w - (\tau_w / \sigma_B) \sigma_{nmax} \quad (4)$$

ただし、 τ_w は静的な軸力が作用しない場合の繰返しねじり単独の場合の疲労限度である。

大気疲労に関する修正 Goodman 線図を Fig. 13 に示す。平滑材の場合、平均応力に 10^7 回疲労試験終了後の試験片の表面残留応力値として、施行材と無施行材それぞれ -570MPa 、 -350MPa を平均応力とした。実験結果は式 (4) で近似される。一方、次に人工ピット材の疲労限度に対する残留応力として、ピットのために疲労起点が必ずしも表面でないことから、無施行材の残留応力は零とみなされる。施行材の場合には Fig. 12 に示すように表面から 0.2mm 程度の深さの、 10^7 回疲労試験後の平均値 -650MPa を平均応力とする。Fig. 13 に示すようにほぼ直線で近似される。このように大気疲労に関しては残留応力として疲労後の残留応力を採用すると修正

Goodman 線図でもって予測することができる。

一方、腐食疲労に関しては、ショットピーニングによって中間寿命域での強度が大きく向上するが、 10^7 回近傍では無施行材に近くなる。これに対して、表面の 0.05mm 程度以下の深さの領域での残留応力は、腐食疲労では -100MPa 以下となり、零に近くなるが、内部には圧縮残留応力域が疲労後も残っている。中間寿命域でこの残留応力が疲労強度の向上に効果を持っていることが予想される。しかし、どの領域の残留応力を平均応力として強度向上の予測に使用すべきであるかは、ねじり腐食疲労におけるき裂の挙動と密接に関係しており、今後の研究が必要である。

4 結 言

硬さ 480HV のばね鋼 SUP7 にショットピーニング施行した平滑材と人工ピットを有する試験片のねじり疲労試験を大気環境および腐食環境で行い、無施行材の場合と比較することからショットピーニングの効果について検討した。以下に結論をまとめる。

(1) 大気中の疲労では、平滑材のショットピーニング施行による疲労強度の向上は比較的小さく、また表面層の電解研磨除去によっても強度は変わらない。また、人工ピット材の切欠き感度はショットピーニングにより低下した。

(2) 腐食疲労強度は、中間寿命域でショットピーニングにより大きく向上したが、 10^7 回近傍の長寿命域では無施行材の強度に近づいた。また、人工ピットによる腐食強度の低下もショットピーニング施行により緩和された。

(3) 大気中の疲労では、ショットピーニング施行材では平滑材、人工ピット材ともに試験片軸に 45° 方向に、つまり主応力に垂直に破壊した。

(4) 腐食疲労の平滑材において、無施行材では腐食ピットから主き裂が発生して主応力方向の破壊を引き起こすのに対して、施行材では平滑材人工ピット材ともに、表面には主応力方向の多数の微小割れが密集して形成され、それらの層が 0.2 から 0.3mm 程度の深さになって主き裂の成長が起こる。

Fig. 13 Modified Goodman diagram for fatigue in air.

(5) ショットピーニング加工により表面から 0.2 から 0.3mm の深さの領域に圧縮残留応力が導入される。疲労後、この残留応力は内部領域では応力振幅に依存して減衰する。また、腐食疲労の表面極近傍では多数の微小割れのために零近くまで減衰する。

(6) 大気中の疲労に関しては、ショットピーニングによる強度向上は残留応力を考慮した修正 Goodman 線図より予測できる。一方、腐食疲労における中間寿命域に対しては圧縮残留応力が効果を持つが、長寿命域ではショットピーニングの効果はなくなる。

参 考 文 献

- 1) M. Mori, "The trend of spring from customer's view Point", The Special Steel, Vol.48, No.3, pp.21-23 (1999).
- 2) T. Nakano, T. Sakakibara, M. Wakita and A. Sugimoto, "Development of high-strength suspension coil springs in which corrosion fatigue strength is important", SAE Transactions, Vol.109, Section No.5, pp.203-209 (2000).
- 3) H. Yoshikawa, T. Sakakibara and M. Wakita, "Stronger material for cold-formed coil springs used in automotive suspensions", SAE Paper, 02M-62 (2002).
- 4) M. Wakita, T. Kuno, A. Amano, A. Nemoto, K. Saruki and K. Tanaka, "Effects of artificial small defect and corrosion environment on torsional fatigue strength of high strength spring steel", Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol.56, No.12, pp.1096-1102 (2007).
- 5) M. Wakita, T. Kuno, A. Amano, A. Nemoto, K. Saruki and K. Tanaka, "Study on predicting formula for torsional fatigue strength of spring steel -Effects of environment, notch and hardness", Transactions of Japan Society for Spring Research, No.52, pp.1-7 (2007).
- 6) Y. Murakami, M. Kobayashi, T. Makino, T. Toriyama, Y. Kurihara, S. Takasaki and R. Ebara, "Quantitative evaluation of the factors influencing fatigue strength of spring steels (Effects of nonmetallic inclusions, shot peening, decarburized layer and small surface pits)", Transactions of Japanese Society of Mechanical Engineers, Vol.57, No.542, pp.27-35 (1991).
- 7) K. Takahashi, T. Amano, T. Miyamoto, K. Ando, F. Takahashi, A. Tange, H. Okada and Y. Ono, "Improvement of fatigue strength by shot peening for spring steel specimens containing an artificial surface defect", Transactions of Japan Society for Spring Research, No.52, pp.9-13 (2007).
- 8) G. H. Farrahi, J. L. Lebrun and D. Couratin, "Effect of shot peening on residual stress and fatigue life of a spring steel", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol.18, No.2, pp.211-220 (1995).
- 9) K. Saruki, N. Hirose and K. Ohbayashi, "Torsional fatigue properties of carburized steel and its improvement by shot peening", Journal of the Japanese Society for Strength and Fracture of Materials, Vol.38, No.4, pp.71-79 (2004).
- 10) The Committee of Corrosion Fatigue Test in Vehicle Suspension Springs, "Study on corrosion fatigue test of vehicle suspension springs", Transactions of Japan Society for Spring Research, No.29, pp.115-149 (1984).
- 11) Y. Murakami, "Effect of small defects and nonmetallic inclusions", p.17 (1993) Yokendo Ltd., Tokyo.
- 12) G. Sines, "Behavior of metals under complex static and alternating stresses", in Metal Fatigue, G. Sines and D. L. Waisman (eds.), pp.155-161 (1959) McGraw-Hill, New York.
- 13) D. L. McDiarmid, "A shear stress based critical-plane criterion of multiaxial fatigue failure for design and life prediction", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol.17, No.12, pp.1475-1485 (1994).