

612 ショットピーニングによる鋼の疲労限度向上と表面欠陥の無害化

横浜国大 ○高橋宏治 横浜国大[院] 天野利彦 横浜国大[院] 花折和也
横浜国大 安藤 柱 日本発条 高橋文雄

Improvement of fatigue limit by shot peening for spring steel specimens containing an artificial surface defect

Koji TAKAHASHI, Toshihiko AMANO, Kazuya Hanaori,
Kotoji ANDO and Fumio TAKAHASHI

1. 緒言

省エネルギーおよび環境問題の観点から、自動車用部品の軽量化が求められている。そのため、これらの部品の疲労限度向上に対する要求が年々高まってきている。しかしながら、鋼は高強度になるほど欠陥に対して敏感となる。自動車用部品等においては、非金属介在物のほか、製造工程等に生じる表面欠陥等が存在する場合がある。表面欠陥を有する材料にショットピーニングを施すことにより、疲労限度の向上、さらには表面欠陥を無害化することができれば、部材の信頼性の大幅な向上および部材の低コスト化を達成できるであろう。

このような観点から、著者らは、ショットピーニングを施すことにより、微小ドリル穴を有するばね鋼の疲労限度を向上させるとともに、表面欠陥を無害化できることを明らかにしている¹⁾。しかし、加工時等に生じるき裂状の表面欠陥を有する材料にショットピーニングを行った後、疲労試験を行った例は極めて少ない²⁾。

そこで、本研究では、表面に種々の寸法の半円スリットを導入した後にショットピーニングを施した鋼を用いて、平面曲げ疲労試験を行った。これにより、き裂状表面欠陥を有する鋼の疲労限度向上に対するショットピーニングの効果を明らかにした。さらに、ショットピーニングによって、疲労限度上無害化できるき裂状表面欠陥の寸法を破壊力学的に評価した。

2. 供試材および実験方法

2.1 供試材 供試材として、ばね用のマンガンクロム鋼 SUP9A を用いた。試験片の形状および寸法を Fig.1(a) に示す。き裂状の人工表面欠陥を導入することを目的として、Fig.1(b) に示すような半円スリットを放電加工により導入した。その後、焼入れおよび焼戻しを行った。熱処理後の硬さは 470HV である。半円スリットの深さは 0.1, 0.2 および 0.3 mm であり、試験片の最小断面部の表面に、長手方向に対して垂直に導入されている。なお、スリット幅 w は約 0.03 mm であり十分に小さいため、半円スリットは半円き裂と等価とみなせる。続いて、無欠陥材および半円スリット材に対して次節で述べる条件でショットピーニングを施した。

2.2 ショットピーニング方法とその条件 ショットピーニング用の装置として、直圧方式の空気式ピーニング装置を使用した。投射材として、粒径約 $\phi 0.67$ mm、硬さ 600HV のコンディショ

ンド・カットワイヤを用いた。本研究では、試験片に予引張応力を負荷した状態でショットピーニングを行なう応力ショットピーニングも実施した。予引張応力は 4 点曲げにより負荷した。試験片にひずみゲージを貼付し、表面の予応力が 1250 MPa となるように 4 点曲げ治具を調節した。以下では、通常のショットピーニングを SP、応力ショットピーニングを SSP と呼ぶ。

2.3 残留応力分布 SP および SSP により得られた残留応力分布を Fig.2 に示す。Fig.2 より、SSP では、SP よりも大きくて深い圧縮残留応力分布が得られたことがわかる。この理由は、予応力を除荷する際に弾性変形で回復する圧縮応力が負荷されたためである。

2.4 実験方法 上記の試験片を用いて、室温・大気中にて平面曲げ疲労試験を行なった。負荷条件は、応力比 $R=0$ 、繰返し周波数 20 Hz、応力波形は正弦波である。また、応力は、試験片の最小断面部の表面における公称応力である。 10^7 回の繰返しに耐えた最大の応力振幅として疲労限度を定義した。試験片の破面観察には、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。

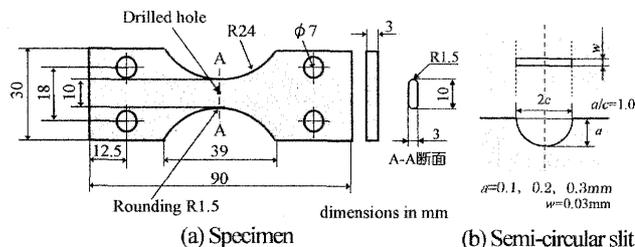


Fig.1 Shape and dimension of specimen and semi-circular slit.

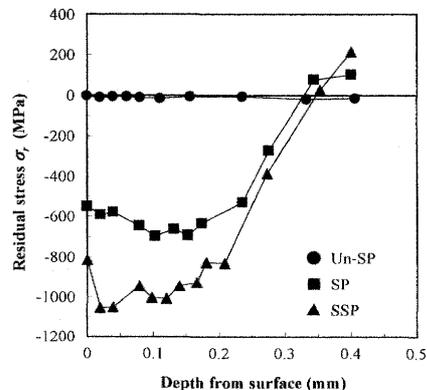


Fig.2 Residual stress distribution.

3. 実験結果および考察

3.1 平面曲げ疲労限度に及ぼすショットピーニングの効果 Fig.3 に, Un-SP(未ショット)材, SP材およびSSP材における負荷応力振幅 σ_a と微小穴の直径 d の関係を示す. Fig.3において, 黒塗りは破断した試験片を, 白抜きは 10^7 回の繰返しにおいて非破断の試験片を示す. 非破断の試験片において, 最大の応力振幅が疲労限度に相当している. Fig.3に示すように, Un-SP材では, 半円スリット深さの増加に伴い, 疲労限度が大幅に低下することが分かる. しかし, SP材およびSSP材では, Un-SP材に対して疲労限度が大幅に向上することが明らかとなった.

Fig.3中にアスタリスク付した試験片は, 半円スリット以外から破断したことを示している. Fig.3にアスタリスクで示すように, SP材およびSSP材では, スリット深さが0.2mm以下であれば, すべての試験片が半円スリット以外から破断した. したがって, これらの試験片は無欠陥材の疲労限度と等価と考えることができる. したがって, SPおよびSSPを施すことによって, 未SP材では有害であった深さが0.2mmまでの半円スリットを無害化できることが明らかとなった.

3.2 停留き裂の観察 停留き裂を観察するため, まず疲労限度における試験片を加熱着色した後, 高応力を負荷して破断させた. Fig.4に示すように, 最大級のもので深さ約160 μ mの停留き裂が観察された. 停留き裂は, 破面に複数確認されたが, 全て穴以外の平滑部を起点として発生していた. この結果から, 深さが0.2mmまでの半円スリットを有する試験片に対してショットピーニングを施した場合には, 生地組織から発生したき裂の停留条件によって疲労限度が決まることが明らかとなった.

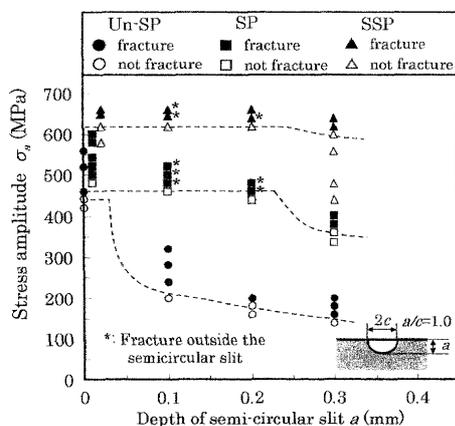


Fig.3 Relationship between stress amplitude and depth of semi-circular slit

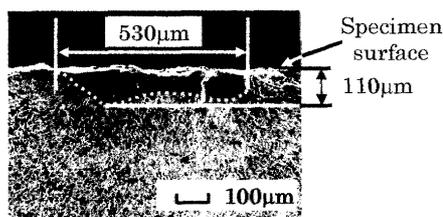


Fig.4 Non-propagating crack. ($a=0.1$ mm, SP, $\sigma_a=460$ MPa).

3.3 無害化可能な最大き裂寸法の破壊力学的検討 応力拡大係数に着目することにより, 無害化可能な最大き裂寸法の検討を行った. 本研究では, 応力拡大係数の正值が疲労き裂伝播に寄与するとして, 以下の式を用いて計算される ΔK_T に着目して破壊力学的検討を行った.

$$\Delta K_T = K_{\max} + K_R \quad (1)$$

ここで, K_{\max} は最大荷重時の応力拡大係数であり, Raju-Newmanの式³⁾を用いて評価した. K_{\max} を評価する際の負荷応力としては, 無欠陥SP材および無欠陥SSP材それぞれの疲労限度に相当する最大負荷応力 σ_{\max} を用いた. 一方, K_R は残留応力による応力拡大係数であり, API-579の簡易解⁴⁾を用いて評価した.

Fig.5に, SP材における半円き裂の ΔK_T とき裂の深さ a の関係を示す. ΔK_{TA} および ΔK_{TC} は, それぞれ半円き裂の最深点および表面点の ΔK_T に対応している. ΔK_b は, El Haddadらの式⁵⁾を用いて計算した. ΔK_T と ΔK_b の交点から無害化可能な最大欠陥寸法 a_{\max} を推定できる.

Fig.5より, SP材の a_{\max} は, $a_{\max}=0.24$ mmと推定できる. また, SSP材では, $a_{\max}=0.27$ mmであった. これは, SPおよびSSPによって $a=0.2$ mmの表面欠陥が無害化でき, $a=0.3$ mmの表面欠陥が無害化に至らなかった実験結果と一致する. よって, SP条件(残留応力分布)が異なっても, 無害化可能な欠陥寸法を評価できた.

4. 結言

深さが0.1~0.3 mmの半円スリットを導入した後にショットピーニング(SP)および応力ショットピーニング(SSP)を行ったばね鋼を用いて, 平面曲げ疲労試験を行った. SPおよびSSPを行なうことにより疲労限度は大幅に向上し, 深さが0.2 mmまでの半円スリットを無害化できることが明らかとなった. さらに, SPおよびSSPにより無害化できる欠陥寸法を破壊力学的に評価する方法を提案した.

参考文献

- 1) 高橋宏治, 他5名, ばね論文集, **52**, 9(2007).
- 2) 高橋文雄, 他3名, ばね論文集, **51**, 9(2006).
- 3) J.C Newman Jr, I.S. Raju, Eng. Fract. Mech. **15**, 185 (1981).
- 4) API(American Petroleum Institute), RP579, C2.2(2000).
- 5) M.H.El Haddad et.al., Eng. Fract. Mech., **11**, 573 (1979).

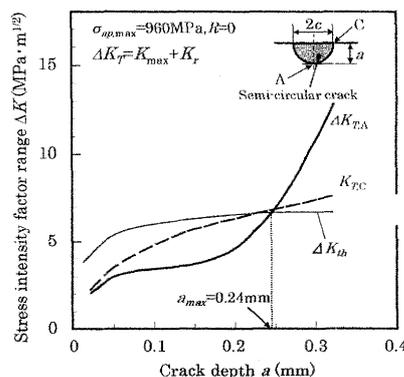


Fig.5 Estimation of non-damaging crack size for SP specimen.