超音波ショットピーニングによる高強度鋼の疲労特性の改善と 表面欠陥の無害化 *

岡田秀樹 **, 高橋宏治 ***

Improvement of Fatigue Properties and Making Surface Defect Harmless for High Strength Steel by Ultrasonic Shot Peening

Hideki OKADA and Koji TAKAHASHI

It has been reported that the fatigue limit of shot peened high strength steels with a semicircular slit of 0.2 mm or less in depth was improved to the same value as that of defect-free shot peened specimens. In this study ultrasonic shot peening (UP) which can introduce deeper compressive residual stress was noticed in order to investigate the effect of the depth of compressive residual stress on the size of surface defect that can be rendered harmless by peening. After UP was applied to the specimens of spring steel (SUP9A) with semicircular slits of 0.2, 0.3 and 0.4 mm in depth, plane bending fatigue tests were carried out under the condition of stress ratio $R = 0$. As the result, it was clarified that the defect size that can be rendered harmless by UP was at least 0.4 mm. In other words, it was found that increasing the depth of compressive residual stress is effective in increasing the size of defect that can be rendered harmless. In addition, the predicted size of the defect rendered harmless by UP based on the stress intensity factor was consistent with the experimental results.

Key Words : Ultrasonic shot peening, Surface defect, Bending fatigue strength, Fracture mechanics, Residual stress

1. 緒言

近年、自動車用巻ばねやスタビライザ、トラック用重ね板ばねにおける軽量化のニーズは高まってきている。これにともない、これらのばねの高強度化が強く求められている。しかし、一般に材料は高強度になるほど欠陥感受性が高くなる。特に、ばね部品は、表面に最大の応力が負荷されるため、材料キズや腐食ピットなどの表面欠陥の寸法が微小であっても疲労限度は大幅に低下してしまう。

疲労限度向上に対しては、ショットピーニング(以降 SP)が有用であるため、これまでに様々な SP 方法が開発されている。代表的なものとして、直径が 0.8mm 前後のショットを遠心方式あるいはエア圧力方式で投射する方法がよく用いられている。さらに、大きな構造物などでは、必要な場所だけに部分的に深い残留応力を付与できる利点から超音波ショットピーニング(Ultrasonic Shot Peening, 以降 UP)が用いられている。超音波ショットピーニングでは、超音波振動により振動工具の上に乗せられたショッ

トを被投射材に衝突させることにより、圧縮残留応力の導入などのピーニング効果を生み出すことができる。ピーニング効果により、歯車や巻ばねの表面に圧縮残留応力が導入できることが示されている¹⁾。さらに、種々の材料の疲労強度に及ぼす超音波ショットピーニングの影響が明らかにされている^{2~4)}。

表面欠陥を有する材料に SP 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、部材のばねの信頼性の大幅な向上及びばねの低コスト化を両立することができるであろう。このような観点からショットピーニングによる表面欠陥の無害化に関する研究が行われている^{5~12)}。これまでの研究において、無害化可能な欠陥寸法は、導入された残留応力分布に依存するが、応力比及びドリル穴や半円スリットなど欠陥の形状の影響は少ないことが報告されている^{11,12)}。しかし、ばね鋼において SP による無害化可能な欠陥寸法は深さ 0.2mm 程度までであり^{5~12)}、より大きな表面欠陥を無害化できれば低

原稿受付日 2019 年 8 月 22 日

* 日本ばね学会 2019 年度春季講演会

** 日本発条株式会社 NHK SPRING Co., Ltd.

*** 横浜国立大学大学院 Yokohama National University

コスト化への効果は大きい。

そこで本研究では、表面に人工微小欠陥を模擬した半円スリットを導入した後に UP を施したばね鋼 SUP9A (硬さ 470HV) を用いて、平面曲げ疲労試験を行った。これにより、半円スリット状の表面欠陥を有するばね鋼の疲労限度向上に対する UP の効果を明らかにした。さらに、破壊力学的検討を行い、UP により無害化可能な表面欠陥寸法の評価を行った。

2. 実験方法

2.1 供試材及び試験片

供試材は、ばね鋼 SUP9A である。Table 1 にその化学成分を示す。実験に用いた平面曲げ疲労試験用試験片の形状を Fig. 1 (a) に示す。試験片は、最小断面部の幅 15mm、厚さ 5mm で試験片中央に最大曲げ応力が負荷されるような形状になっている。

本研究で使用する試験片の作製手順を Fig. 2 に示す。本研究では、き裂状の表面欠陥を模擬した半円スリットを試験片中央部に導入したスリット材と、比較のために平滑材を用いた。Fig. 1 (b) に、半円スリットの形状を示す。半円スリットの直径／深さ (単位:mm) は、0.4/0.2、0.6/0.3 及び 0.8/0.4mm であり、3 種類のスリットの形状はほぼ相似である。以降では、半円スリットの深さに着目してそれぞれ 0.2 スリット材、0.3 スリット材及び 0.4 スリット材と称す。半円スリット加工後、供試材を実用硬さである 470HV に調整するために、Fig. 3 に示すような熱処理を行った。焼入れ処理は、真空雰囲気中にて 700℃ で 30 分保持した後、さらに 860℃ に温度を上げて 45 分保持し、その後油冷を行った。また、焼戻し処理は、電気炉を用い、大気中で 460℃ まで加熱し、60 分保持後空冷を行った。熱

Table 1 Chemical composition of SUP9A (mass %)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.57	0.25	0.86	0.022	0.019	0.82

Fig. 1 Shape and dimension of specimen : dimensions in mm.

Fig. 2 Specimen manufacturing process (SUP9A, 470HV).

Fig. 3 Heat treatment conditions.

処理後、ビッカース硬度計を用いて荷重 0.49N にて 4 点の硬さを測定した結果、平均値で 470HV であった。

2.2 超音波ショットピーニングの施工

一部の供試材に関しては、前述の熱処理後、Table 2 に示す条件で UP を施した。UP 装置として、東洋精鋼製の超音波ショットピーニング装置を使用した。ショット材として、球径 4mm、硬さ 670HV の硬球を用いた。UP を施工した試験片を、それぞれ平滑 UP 材、0.2 スリット UP 材、0.3 スリット UP 材、0.4 スリット UP 材と称す。

Fig. 4 に、UP によって平滑材に導入された残留応力分布を示す。UP により導入された表面の圧縮残留応力及び最大圧縮残留応力は、それぞれ 741MPa、901MPa であった。また、圧縮残留応力が引張残留応力に変わる深さ (クロッシングポイント) は $d_0=0.8\text{mm}$ であった。ばね鋼において、深さ 0.2mm のドリル穴を SP により無害化できることが

Fig. 4 Residual stress distributions.

Table 2 Ultrasonic shot peening conditions

Shot Peening machine	Ultrasonic shot peening
Frequency	20kHz
Amplitude of vibration	150μm
Shot diameter	4mm
Shot hardness	670HV
Shot projection time	80sec
Projector distance	90mm
Arc height	0.289mmC

疲労試験で報告されているが、この際には粒径が 1.0mm のショットを用いており、表面及び最大の圧縮残留応力はそれぞれ 606MPa、688MPa、クロッシングポイント $d_0 = 0.33\text{m}$ であった¹⁰⁾。これに比べて UP の圧縮残留応力の深さは約 2 倍であり、より大きな表面欠陥の無害化が期待される。

2.3 疲労試験方法

疲労試験には、平面曲げ疲労試験機を用いた。負荷条件は、応力比 $R=0$ (一定)、繰り返し周波数 10Hz、応力波形 = 正弦波である。本研究において、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り、疲労限度は 10^7 回の繰り返しの耐えた最高の公称応力の振幅として定義した。また、試験片の表面や破断面の観察には、走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いた。

3. 実験結果

3.1 疲労限度におよぼす UP の効果

各試験片における負荷応力振幅と疲労寿命の関係 (S-N 曲線) を、スリット深さごとに Fig. 5 (a) ~ (d) にそれぞれ示す。なお、◆印は未 UP 材を、□印は UP 材を示している。アスタリスク印はスリット以外から破断したことを示している。また、各試験片の疲労限度も併記した。Fig. 5 より、UP を施すことにより、平滑材及びスリット材ともに疲労限度が大幅に向上したことが確認できる。さらに、UP スリット材はすべてスリット以外から破断した。

Fig. 6 は、UP 材の未 UP 材に対する疲労限度の向上率を示している。未 UP 材に対し、UP 材では 239% 疲労限度が向上した。これらの疲労限度向上は、UP により大きくて深い圧縮残留応力の効果によるものと考えられる。

3.2 疲労破面の観察

疲労破面の走査電子顕微鏡写真を Fig. 7 に示す。Fig. 7 より、平滑材の破壊起点は試験片表面の有効部または曲率部であることが確認できる。未 UP 材の破壊起点は半円スリットであったが、UP 材のそれは半円スリットではなくすべて平滑部であった。

3.3 UP によって無害化可能な表面欠陥寸法

半円スリットの深さと負荷応力振幅の関係を Fig. 8 に示す。Fig. 8 において、黒色のプロットは破断した試験片

Fig. 5 S-N curve for plane bending fatigue test. (SUP9A, 470HV, $R=0$).

Fig. 6 Improvement ratio of fatigue limit (SUP9A, 470HV, $R=0$).

Fig. 7 SEM images of fracture surface of bending fatigue test specimens (SUP9A, 470HV, $R=0$).

を、白抜きのプロットは非破断 (10^7 回) の試験片を示す。白抜きのプロットにおいて、最大の応力振幅が疲労限度に相当している。なお、アスタリスク印は半円スリット以外を起点として破断したことを示す。ここで本研究では、次の二項目のいずれかを達成できたとき、欠陥の無害化が可能であると定義する。

- ① UP を施した半円スリット材の疲労限度が、同じ UP を施した平滑材のそれの 5 % 以内であったとき。
- ② UP を施した半円スリット材の破壊起点が半円スリット以外であったとき。

Fig. 8 より、アスタリスク印で示すように、UP スリット材はすべて半円スリット以外から破断した。したがって上記無害化の定義①または②より、UP によって深さ $a=0.4\text{mm}$ までの半円スリットの無害化を達成したと評価できる。

3.4 UP により無害化可能な表面欠陥寸法の推定

これまでの研究により、半円スリットなどの表面欠陥を表面き裂と等価とみなすことにより、疲労限度を定量的に評価できることが明らかになっている。本研究においては、スリット穴を半円き裂と等価と仮定し、その応力拡大係数に着目することにより、無害化可能な最大欠陥寸法の評価を行った。本研究では、応力拡大係数の正値が疲労き裂伝ぱに寄与するとして、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。

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

ここで、 $K_{\max}$ は最大荷重時の応力拡大係数であり、Newman-Raju の式を用いて評価した¹³⁾。 $K_{\max}$ 評価時の負荷応力としては、無欠陥 UP 材の疲労限度に相当する最大負荷応力 $\sigma_{\max}=840\text{MPa}$ を用いた。一方、 K_R は残留応力による応力拡大係数である。残留応力場における応力拡大係

Fig. 8 Relationship between stress amplitude and depth of slit (SUP9A, 470HV, $R=0$).

数の計算式としては、米国石油協会の規格 (API RP579) による 4 次式を用いた¹⁴⁾。平板中に存在する半円表面き裂の応力拡大係数は次式 (2) で表すことができる。

$$K_R = \left[G_0 \sigma_0 + G_1 \sigma_1 \left(\frac{a}{t} \right) + G_2 \sigma_2 \left(\frac{a}{t} \right)^2 + G_3 \sigma_3 \left(\frac{a}{t} \right)^3 + G_4 \sigma_4 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} f_w \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$Q = 1.0 + 1.464 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.65} \quad f_w = \left\{ \sec \left(\frac{\pi c}{2W} \sqrt{\frac{a}{t}} \right) \right\}^{0.5}$$

上式において、 G_0 から G_4 は米国石油協会の規格 (API RP579) による応力拡大係数の形状補正係数を表す。 a 及び c は、それぞれ半円表面き裂の深さ及び表面長さである。 W 及び t は、それぞれの板幅及び板厚である。 $\sigma_0 \sim \sigma_4$ は、次式 (3) を用いて残留応力分布を 4 次多項式近似して得られる係数である。

$$\sigma_R(x) = \sigma_0 + \sigma_1 \left(\frac{x}{t} \right) + \sigma_2 \left(\frac{x}{t} \right)^2 + \sigma_3 \left(\frac{x}{t} \right)^3 + \sigma_4 \left(\frac{x}{t} \right)^4 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここで、 x はき裂が存在する表面から深さ方向への距離である。本研究では Fig. 4 に示した UP による圧縮残留応力分布を 4 次多項式近似して K_R を評価した。Fig. 9 に UP 材における半円き裂の ΔK_T とき裂深さ a の関係を示す。 ΔK_{TA} 及び ΔK_{TC} は、それぞれ半円き裂の最深点及び表面点の ΔK_T に相当している。本研究で対象となるき裂は微小き裂であるために、 ΔK_{th} はき裂寸法依存性を示す。 ΔK_{th} のき裂長さ依存性の式としては種々提案されているが、本研究では、ばね鋼において有用性が確認されている El Haddad らの式¹⁵⁾に基づいて丹下らにより提案された (4) を用いて ΔK_{th} を計算した¹⁶⁾。

$$\Delta K_{th} = \left\{ \left(\frac{1}{\Delta K(L)_{th}} \right)^2 + \left(\frac{1}{\alpha \Delta \sigma_{w0} \sqrt{\pi a}} \right)^2 \right\}^{-1/2} \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで $\Delta K(L)_{th}$ は、巨視き裂の下限界応力拡大係数範

Fig. 9 Distribution of stress intensity factor for UP (SU-P9A, 470HV, $R=0$).

囲である。本研究では、小山らが提案した予測式を用いて得られた $\Delta K(L)_{th} = 6.0 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ を適用した。 $\Delta \sigma_{w0}$ は平滑材の疲労限度の応力範囲 ($= 2\sigma_{w0}$) である。 a は表面き裂の深さである。また α は形状係数であり、Newman-Raju の式から求められる。

半円スリットを表面き裂と等価と仮定すれば、 ΔK_T と ΔK_{th} の大小関係から存在する半円スリットが疲労限度上有害か否かを評価することができる。もし、 ΔK_T が ΔK_{th} よりも小さければ、その半円スリットは無害であると評価される。したがって、 ΔK_T と ΔK_{th} 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. 9 より、UP 材では $a_{max} = 660 \mu\text{m}$ (0.66mm) と推定できる。これは、UP によって $a = 0.4\text{mm}$ までの表面欠陥が無害化できた実験結果と整合する。

4. 結 言

(1) 深さ $a = 0.2, 0.3, 0.4\text{mm}$ の半円スリット欠陥を有するばね鋼 SUP9A (470HV) に超音波ショットピーニングを施すことにより、疲労限度が大幅に向上した。疲労限度向上率は $a = 0.2\text{mm}$ では 126%, $a = 0.3\text{mm}$ では 239%, $a = 0.4\text{mm}$ では 239%であった。

(2) UP を行った深さ 0.4mm までの半円スリットは、破壊起点がすべて半円スリット以外からの破壊であった。したがって、UP により、少なくとも深さ $a = 0.4\text{mm}$ までの半円スリットを無害化することができた。

(3) 破壊力学を用いた検討を行い、ばね鋼 SUP9A (470HV) の無害化可能な最大欠陥寸法は、UP では $a_{max} = 0.66\text{mm}$ であると予測された。この結果は、上記 (2) で述べた実験により得られた無害化可能な欠陥寸法よりも大きな値である。したがって、予測結果は実験結果と整合した。

参考文献

- 1) Hattori Kaneshi, Watanabe Yoshihiro, Handa Mitsuru, Duchazeaubeneix Jean-Michel, Shot Peening, (2006), 31.
- 2) 林 義一郎, 半田 充, 菅田 淳, 日本機械学会論文集,

Vol.81, No.821, (2015), 14-00199.

- 3) Pandey Vaibhav, Chattopadhyay K., Santhi Srinivas N. C., Singh Vakil, International Journal of Fatigue, 103, (2017), 426.
- 4) 武田 亘平, 上村 大樹, 服部 兼久, ばね論文集, No.64, (2019), 33.
- 5) 高橋文雄, 丹下 彰, 小野芳樹, 安藤 柱, ばね論文集, No.51, (2006), 9.
- 6) 高橋宏治, 天野利彦, 宮本貴正, 安藤 柱, 高橋文雄, 丹下 彰, 岡田秀樹, 小野芳樹, ばね論文集, No.52, (2007), 9.
- 7) 高橋文雄, 丹下 彰, 安藤 柱, ばね論文集, No.53, (2008), 1.
- 8) ばねの許容欠陥寸法に関する研究委員会, ばね論文集, No.53, (2008), 57.
- 9) 高橋宏治, 林 卓見, 安藤 柱, 高橋文雄, ばね論文集, No.55, (2010), 25.
- 10) ばねの高強度・信頼性化技術研究委員会, ばね論文集, No.56, (2011), 49.
- 11) 中川真樹子, 高橋宏治, 長田俊郎, 岡田秀樹, 古池仁暢, ばね論文集, No.59, (2014), 13.
- 12) 高橋宏治, 安田 順, 古池仁暢, 岡田秀樹, ばね論文集, No.60, (2015), 7.
- 13) Newman Jr, J.C., Raju, I.S., Eng. Fract. Mech., 15 (1981), 185.
- 14) American Petroleum Institute, "Recommended practice 579 fitness for service", pp.C3-C10 (2000) American
- 15) El Haddad, M.H., Topper, T.H. and Smith, K.N., Eng. Fract. Mech., 11 (1979), 573.
- 16) 丹下 彰, 阿久津 忠良, 高村典利, ばね論文集, No.36, (1991), 47.