ばね鋼におけるショットピーニング残留応力分布と 疲労き裂伝播寿命の関係について*

Relation between shot-peening residual stress distribution
and fatigue crack propagation life in spring steel

丹下 彰**, 阿久津 忠良**, 高村 典利***

Akira TANGE · Tadayoshi AKUTU · Noritoshi TAKAMURA

ショットピーニングによる残留応力分布の疲労き裂伝播寿命への影響について、ばね鋼に関して研究した。

結果は以下のようにまとめられる。

- (1) ばね鋼における微小き裂伝播開始条件を決定するために、我々は Haddad の整理法に硬さおよび応力比依存性を考慮する方法を提案した。
- (2) 疲労き裂伝播寿命向上には、表面圧縮残留応力を高めることが非常に重要である。
- (3) 疲労き裂伝播寿命の大半は疲労き裂が表面から圧縮残留応力が最大となる位置にまで伝播する間に費やされる。
- (4) 内部の圧縮残留応力が最大となる位置は表面に近かければ近いほど、疲労き裂伝播寿命は向上する。
- (5) 本手法によって予測される S-N 曲線は、実際の回転曲げ疲労試験結果とよく対応している。

We performed the following study to examine the influence of the residual stress distribution by shot-peening on the fatigue crack propagation life. The results we obtained are as follows ;

- (1) To define the threshold conditions of small crack propagation in spring steels, we proposed a method which consists of applying the hardness and stress ratio dependency to Haddad's consolidation.
- (2) It is very important to raise the surface residual stress for improving the fatigue crack propagation life.
- (3) Most of the fatigue crack propagation life is spent while the crack propagates from the surface to the position where the compressive residual stress is maximum.
- (4) The nearer to the surface the position where the compressive residual stress is maximum, the longer fatigue crack propagation life is extended.
- (5) The predicted S-N curve by this method shows good correspondence with the actual results of the rotary bending fatigue tests.

1. はじめに

ショットピーニングによって得られる残留応力分布は、ショットピーニング条件およびばね硬さによっては表面残留応力値が低く内部に残留応力の最大値が存在するなど特異な形態があり複雑である。そのため、どのような残留応力分布が疲労寿命向上に適しているかの詳細については十分に解明されていない。また、

ばね鋼のような高強度材料では微小き裂からの疲労破壊が問題となるが、高強度材料の微小き裂伝播開始条件は実験的な困難さのためか報告も少ない。

そこで、本論文では微小き裂からの疲労き裂伝播開始条件については、Haddad の整理法に硬さおよび応力比依存性(残留応力と平均応力を等価とみなし)を追加拡張することで決定した。また、残留応力のき裂伝播抑制効果については、大きき裂で得られた線形破壊力学にもとづくき裂伝播速度と応力拡大係数範囲との関係を得られた微小き裂伝播開始条件にまで延長適用することで求めている。

原稿受付日 1990年9月28日

* ばね技術研究会1990年度春季講演会にて発表

** ㈱日発グループ中央研究所(NHK Spring R & D Center Inc.)

*** 日本発条株式会社 精密ばね事業本部 (Precision Spring Division NHK Spring Co., Ltd.)

2. ばね鋼における微小き裂伝播開始条件について

2.1 微小き裂の特徴について

大きき裂における疲労き裂伝播開始条件(すなわちき裂材の疲労限度)は、線形破壊力学によって材料および材料強度に固有の値である下限界応力拡大係数範囲(ΔK_{th})で決定されることが一般に認められることとなっている¹⁾。しかしながら、ばね鋼などの高強度材料を疲労破壊に導くき裂はいわゆる微小き裂であり、大きき裂で求められる ΔK_{th} よりも小さな ΔK_{th} でき裂伝播が生じ、かつき裂長さが小さいほど ΔK_{th} は小さな値を示すと報告されている²⁾。この原因は微小き裂では線形破壊力学で前提としている小規模降伏条件を満たさない、またはき裂寸法が結晶粒寸法に近く等方等質の仮定が成立しにくくなる、更にはき裂閉口が小さいためとされている。このため大きき裂で測定した下限界応力拡大係数範囲(以下、 $\Delta K(L)_{th}$ と記す)を用いて疲労き裂の伝播開始条件とすると危険側の評価をくだすとの総説もある³⁾⁴⁾。

そこで、最近では特にき裂閉口を厳密に測定しき裂の伝播に有効に寄与する応力拡大係数範囲(有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff})を用いて疲労き裂の伝播開始条件を求める報告も多い⁵⁾。しかしながら、数十ミクロンの微小き裂の閉口を厳密に測定することは非常に困難で工業的に使用するには不都合な面も多い。

また、村上⁶⁾は多くの線形破壊力学的方法で得られた実験結果を整理し、硬さとき裂長さのみから疲労き裂伝播開始条件を決定しこの困難さを克服している。

一方、Haddad⁷⁾は欠陥のない平滑材の疲労限度($\Delta\sigma_w/2$)と大きき裂での疲労限度すなわち $\Delta K(L)_{th}$ とからその中間域である微小き裂の疲労限度($\Delta\sigma_{th}/2$)を(1)、(2)式として提案している。したがって微小き裂における下限界応力拡大係数範囲($\Delta K(S)_{th}$ と記す)は(3)式となる。ただし、ここで応力拡大係数範囲の計算は $\Delta K = \alpha \Delta\sigma \sqrt{\pi a}$ としている。

このHaddadの提案式は比較的測定の容易な $\Delta K(L)_{th}$ 値を使用できることで便利なものであるが、平滑材の疲労限度については、高強度材においては非金属介在物折損のため実験的に決定することは困難である。

$$\Delta\sigma_{th} = \frac{\Delta K(L)_{th}}{\alpha \sqrt{\pi(a+a_0)}} \quad (1)$$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K(L)_{th}}{\alpha \Delta\sigma_w} \right)^2 \quad (2)$$

$$\Delta K(S)_{th} = \alpha \Delta\sigma_{th} \sqrt{\pi a} = \frac{\Delta K(L)_{th} \sqrt{a}}{\left[a + \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K(L)_{th}}{\alpha \Delta\sigma_w} \right)^2 \right]^{1/2}} \quad (3)$$

2.2 ばね鋼における微小き裂の疲労き裂伝播開始条件について

本論文では、Haddadの整理法を用いて、硬さと応力

比を考慮したばね鋼の微小き裂の疲労き裂伝播開始条件を求めるために、つぎのように平滑材の疲労限度($\Delta\sigma_w/2$)と大きき裂の $\Delta K(L)_{th}$ を決定している。

図1. 推定される理想材料の疲労限度と硬さの関係⁸⁾

図2. SUP7の硬さと疲労き裂伝播特性の関係¹⁰⁾

高硬さ材における真の平滑材疲労限度の硬さ依存性は、図1に示す清水ら⁸⁾の推定結果から(4)式として読み取れる。

また、応力比($R = \sigma_{min}/\sigma_{max} = (\sigma_{10} - \sigma_a)/(\sigma_m + \sigma_a)$)依存性は完全片振り($R = 0$)の疲労限度 $\Delta\sigma_{w,R=0}/2$ と両振り($R = -1$)の疲労限度 $\Delta\sigma_{w,R=-1}/2$ との関係(5)式が知られている⁹⁾。

そこで、 $\sigma_a - \sigma_m$ 表示された耐久限線図上で $\sigma_a = -0.205\sigma_m + \Delta\sigma_{W,R=-1}/2$ の成立を仮定すると(6)式が得られる。したがって平滑材の硬さおよび応力比を考慮した疲労限度は(6)式に(4)式を代入することで決定される。

$$\frac{\Delta\sigma_{W,R=-1}}{2} = \frac{1.73HV - 3.39}{9.8} \quad (4)$$

where HV means Vickers hardness.

$$R = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}} = \frac{\sigma_a - \sigma_m}{\sigma_a + \sigma_m}$$

where R means stress ratio.

$$\frac{\Delta\sigma_{W,R=0}}{2} = 0.83 \times \frac{\Delta\sigma_{W,R=-1}}{2} \quad (5)$$

$$\sigma_a = -0.205\sigma_m + \frac{\Delta\sigma_{W,R=-1}}{2}$$

$$\frac{\Delta\sigma_{W,R=R}}{2} = \frac{(1-R)}{(1.205 - 0.795 \times R)} \times \frac{\Delta\sigma_{W,R=-1}}{2} \quad (6)$$

また、大きき裂を有するばね鋼の応力比 $R = 0$ の疲労き裂伝播速度と応力拡大係数範囲の関係は著者ら¹⁰⁾によって図2のように得られ、 $\Delta K(L)_{th}$ の硬さ依存性およびパリス則の成立する範囲での硬さ依存性についても(7)、(8)式のように定式化されている。また、 $\Delta K(L)_{th}$ の応力比依存性を Luckas¹¹⁾にしたがって(9)式とする。したがって、(9)式へ(7)式を代入することで硬さおよび応力比を考慮した大きき裂の $\Delta K(L)_{th}$ が決定される。

$$\Delta K(L)_{th,R=0} = \begin{cases} -H + 66 & \text{HRC} \leq 56 \\ 10 & \text{HRC} > 56 \end{cases} \quad (7)$$

$$\frac{da}{dn} = C \times \Delta K^m \quad (8)$$

$$C = 2.018 \times 10^{-14} \times 1.195^H$$

$$m = -2.50 \times 10^{-2} \times H + 4.425$$

where H means Rockwell hardness.

$$\Delta K(L)_{th,R=R} = (1-R)^G \Delta K(L)_{th,R=0} \quad (9)$$

Gについては宇佐美¹⁴⁾が、 $-5 < R < 0$ の応力比について $G = 0.8$ と報告しているが、ここでは $G = 0.75$ を用いることとした。

したがって、(6)、(9)式を Haddad の(1)、(2)、(3)式に代入することによって種々の硬さと応力比における微小き裂の場合の疲労き裂伝播開始条件が決定される。

図3に種々の応力比でのき裂長さ(a)とき裂が伝播開始する限界の応力振幅($\Delta\sigma_{th}/2$)との関係の例を示す。ただし、ここで用いた応力拡大係数の計算は $\Delta K = (2/\pi) \Delta\sigma \sqrt{\pi a}$ としているが、これは半径 a の円盤状き裂に垂直応力が作用する場合である。同図から $\Delta\sigma_{th}/2$ は R が小さくなるほど大きな値をとることがわかる。また R が小さいということは平均応力が低いことを意味し圧縮残留応力のき裂伝播開始抑制効果が大きいことを示唆している。

2.3 微小き裂からの疲労き裂伝播開始条件の検証

また、この整理法の妥当性を検証するために代表的な微小欠陥である非金属介在物からの折損データ¹²⁾(起点となった介在物サイズと介在物に作用していた応力)との比較を図4で行っている。ここでは長径 2 a の楕円形介在物を直径 2 a の円盤状クラックとみなしている。この折損データはショットピーニングを施したば

図3. 種々の応力比におけるクラック長さと疲労き裂伝播開始応力の関係

ね用線材の回転曲げ疲労試験($R = -1$)によって得られた結果であるが折損位置は圧縮残留応力がゼロになる位置よりも深いものが大半であり残留応力の影響は小さいものと考えられる。同図より、本整理法によって得られた微小き裂の疲労破壊限度線は折損データの

下限界を形成し良くその結果と対応している。したがって、本手法によれば硬さおよび応力比を考慮した微小き裂を有するばね鋼の疲労き裂伝播開始条件の決定が可能となっている。

図4. 推定された微小疲労き裂伝播開始条件と介在物折損データの比較

3. 微小き裂を有するばね鋼の疲労き裂伝播速度へ及ぼす硬さおよび応力比の影響

大きき裂の場合の疲労き裂伝播速度と応力比の関係について太田¹³⁾は(10)式を提案している。ここでは、(11)式に示すように(10)式の $(1-R)^G \Delta K_{th, R=0}$ の代わりに2.2で決定された硬さおよび応力比依存性を考慮した微小き裂の $\Delta K(S)_{th, R=R}$ を用いることとする。この仮定は図5に示すように大きき裂でのき裂伝播特性を微小き裂の伝播開始条件にまで延長することを意味している。

したがって、疲労き裂伝播寿命は(11)式をき裂長さに対して(12)式のように積分することで得られる。

$$\frac{da}{dn} = C(1-R)^{-mG} [\Delta K^m - \{(1-R)^G \Delta K(L)_{th, R=0}\}^m] \quad (10)$$

$$\frac{da}{dn} = C(1-R)^{-mG} [\Delta K^m - \Delta K(S)_{th, R=R}^m] \quad (11)$$

$$Nf = \int_0^{Nf} dn = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(1-R)^{-mG} [\Delta K^m - \Delta K(S)_{th, R=R}^m]} \quad (12)$$

図5. 仮定した微小疲労き裂伝播特性と大きな疲労き裂伝播特性の関係

図6. 残留応力分布形態と疲労き裂伝播の関係
 初期き裂長さ (0.01 mm) HV 580 $d = \phi 4$
 応力条件 $\sigma_a = \pm 99.5 \text{ kgf/mm}^2$

4. 残留応力分布と疲労き裂伝播寿命の関係

ショットピーニングで得られる残留応力分布はショットピーニング条件等(ショットサイズ, ショット形状, 投射速度)および被ショット材硬さにより種々の形態をとりそのことにより疲労寿命は大きな影響を受ける。ここでは代表的残留応力分布の場合について(12)式に基づいて疲労起点が表面となる表面からの疲労き裂伝播寿命を計算し、寿命へ及ぼす分布形態の影響を明らかにすることを試みた。解析条件は(a)表面残留応力の値の影響、(b)内部に残留応力値のピークを生じた場合のピーク位置の表面からの深さの影響、そして(c)残留応力

がゼロになる表面からの深さの影響である。

図6にこれらの代表的な残留応力分布の疲労き裂伝播寿命へ及ぼす影響、すなわち繰返し数と疲労き裂長さの関係を(12)式に基づいて数値積分により求めた結果を示す。

なお解析条件は、硬さ HV580、線径 $\phi 4$ のばね鋼 SUP7 に回転曲げ疲労試験を応力条件 $\sigma_a = \pm 99.5 \text{ kgf/mm}^2$ で行った場合についてであり、初期き裂は半径 0.01 mm の半円状表面き裂が曲げ応力方向に垂直に存在したとしている。また、応力拡大係数の計算には(13)式¹⁵⁾を用いている。

$$\Delta K = 0.66 \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (13)$$

結果は以下のようにまとめられる。(a)表面残留応力値の影響は非常に大きく、表面残留応力値を高くすることは疲労き裂伝播寿命向上に大きく寄与する(図6-a)。(b)内部に残留応力の最大値のピークを生じる場合の表面からの深さの影響は、その位置が表面に近いほど疲労き裂伝播寿命は大きくなる。また、伝播寿命の大半はき裂が残留応力の最大値を示す位置にまで伝播する間に費やされる(図6-b)。(c)残留応力がゼロとなる深さの影響は、その深さが深いほど伝播寿命は大きくなるがその寄与は小さい(図6-c)。この結果は(b)の伝播寿命の大半はき裂が残留応力の最大値を示す位置にまで伝播する間に費やされることと対応している。

図7. 計算に用いた残留応力分布 $d = \phi 4$

図8. 推定されるS-N曲線と回転曲げ疲労データとの比較

5. 実際の疲労試験結果との対応について

比較に用いた供試材は図7に示すように硬さおよび残留応力分布が大きくことなった2条件のばね用線材で、その結果として図8の回転曲げ疲労試験の疲労寿

命に著しい差が生じている。

また、本手法によれば硬さ、残留応力分布さらに初期き裂形態が既知であれば(12)式からS-N線図を推定することが可能となる。そこでS-N線図の推定を行

うために、硬さは既知の値を用い、残留応力分布は図7に実線で示した実際に近いものを用いている。しかしながら初期き裂については不明であるためここでは図7に記してある最大表面粗さの値を半径とする半円形表面き裂が曲げ応力方向に垂直に存在していたとしてS-N線図を作成した。

推定結果は図8に示すように疲労限度および時間寿命共にかなり実際の疲労試験結果に近く、本手法の有効性が確認されている。

6. まとめ

結果は以下のようにまとめられる。

- (1)ばね鋼の微小き裂伝播開始条件として Haddad の整理法に硬さおよび応力比依存性を考慮する方法を提案した。
- (2)疲労き裂伝播寿命の向上には表面残留応力値を高めることが非常に重要である。
- (3)疲労寿命の大半はき裂が表面から圧縮残留応力が最大になる位置にまで伝播する間に費やされる。
- (4)圧縮残留応力が最大になる位置は表面に近いほど寿命は向上する。
- (5)残留応力がゼロとなる深さの影響は、その深さが深いほど伝播寿命は大きくなるがその寄与は小さい。
- (6)本手法は実際のショットピーニングを施したS-N線図を良く推定する。

謝辞

本研究を行うに際し、横浜国立大学工学部安藤柱助教授に適切な御助言をいただきましたことを感謝致します。

参 考 文 献

- 1) 北川英夫, 材料, 26-284(1977), p.482.
- 2) 北川英夫, 高橋進, 機論, 45巻, 399号(昭和54-11), p.1289.
- 3) 田中啓介, 機論, 54巻, 497号(昭63-1), p.1.
- 4) 宇佐美三郎, 木本寛, 福田嘉男, 志田茂, JHPI Vol. 22 no. 3(1984), p.121.
- 5) Elber, W., ASTM Spec. Tech. Publ., 486 (1971), p.230.
- 6) 村上敬宣, 遠藤正浩, 材料, 35巻, 395号(昭61-8), p.911.
- 7) M. H. El Haddad, T. H. Topper and K. N. Smith Engng Fracture Mech. 11, 573-584(1979)
- 8) 村上敬宣, 清水真左男, 機論, 54-499, A (昭63), p.413.
- 9) 川田雄一, 金属の疲労と設計, オーム社(昭51), p.110.
- 10) 小山博, 北村朗, 丹下彰, ばね論文集, 29(1984), p.30.
- 11) Kleonil, M. and Luckas, P., Eng. Fract. Mech., 4(1972), p.77.
- 12) 非金属介在物評価委員会, ばね論文集, 32(1987), p.52.
- 13) Ohta, A., et al, Trans. NRIM, 19(1977), p.183.
- 14) S. Usami, Fatigue Thresholds(1981) Engg Materials Advisory Service
- 15) Soc. Mat. Sci. Japan, "STRESS INTENSITY FACTORS HANDBOOK", Edited by Y. Murakami, (1987), Pergamon Press.