表面処理によって生じた残留応力のステンレス鋼の疲労強度に及ぼす影響

Effect of Residual Stress Induced by Surface Treatment
on Fatigue Strength of Stainless steel

○学 高桑 脩 (東北大学) 正 祖山 均 (東北大学)

Osamu TAKAKUWA, Tohoku University, Aramaki aza aoba 6-6-01, Aoba-ku, Sendai, Miyagi
Hitoshi SOYAMA, Tohoku University

Key Words : Residual Stress, Fatigue, Surface Treatment, X-ray Diffraction, Two-dimensional Method

1. 緒 言

残留応力は機械加工や熱処理、溶接などによって発生し、工業的用途に使われる様々な機械部品、構造物に存在している。表面近傍の残留応力は疲労強度や応力腐食割れに関わっており、材料の機械的特性に大きな影響を与えていることが知られている。したがって、残留応力を正確に計測することは材料の評価を行う上で非常に重要なことである。

残留応力の計測では、一般的に X 線回折法が多く用いられている。X 線回折法には、主に、従来から利用されている 0 または 1 次元 PSPC を用いた $\sin^2\psi$ 法⁽¹⁾と、近年利用され始めた 2 次元 PSPC を用いた 2D 法⁽²⁾がある。

X 線回折法の一般的な測定方法では X 線の侵入深さにより、表面からおおよそ 10 μm の深さまでの平均的な残留応力を計測しているが、機械加工や表面処理を施すことにより、表面から数 μm の極表面層において応力特異場が存在している。近年、極表面層の残留応力はシンクロトロン放射光を用いて計測されている⁽³⁾。しかし、通常の X 線を用いた計測方法でも、前述した 2D 法を用いることにより極表面層の残留応力を簡便に計測することが可能である。なお、極表面層に存在する残留応力が材料の特性に与える影響については、まだ報告されていない。

これまでに、キャビテーション気泡の崩壊衝撃力を活用したキャビテーション・ショットレス・ピーニング CSP による疲労強度向上が実証⁽⁴⁾されており、CSP による疲労強度向上の主因は圧縮残留応力の導入であると考えられている。一方、円盤型砥石による研磨処理により引張残留応力が生じることが知られている。

よって本報では、CSP や研磨処理などの表面処理によって生じた極表面層の残留応力を 2D 法により評価し、残留応力分布により制御することで、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L の疲労強度に差異が生じることを平面曲げ疲労試験により明らかにした。

2. 実験装置および方法

残留応力は、2 次元 PSPC を用いた 2D 法で求めた。図 1 には 2D 法における座標を示す。本実験では、 χ, ψ を 21 通りに変えて 2 次元 PSPC によりデバイリングを計測し、式(1)を満たすように残留応力を求めた。

$$p_1\sigma_x + p_2\sigma_y + p_3\sigma_z + p_4\tau_{xy} + p_5\tau_{yz} + p_6\tau_{zx} = \ln\left(\frac{\sin\theta_0}{\sin\theta}\right) \quad (1)$$

ここで、 p_i と σ および τ はそれぞれ、応力係数および応力値であり、 θ_0 は無ひずみ状態での回折角である。

図 2 には X 線の侵入深さを算出するための模式図を示す。入射前の X 線強度 I_1 と、深さ d まで侵入した際に材料内部で減衰した X 線強度 $I_{(d)}$ の間には式(2)の関係がある。

Fig. 1 Coordinate of 2D method

$$I_{(d)} = I_1 \left[1 - \exp\left(-\mu\rho d \left(\frac{1}{\sin\omega} + \frac{1}{\sin(2\theta-\omega)}\right)\right) \right] \quad (2)$$

$$d = -\ln\left(1 - \frac{I_{(d)}}{I_1}\right) \times \left(\mu(\lambda)\rho \left(\frac{1}{\sin\omega} + \frac{1}{\sin(2\theta-\omega)}\right)\right)^{-1} \quad (3)$$

ここで、 μ, ρ はそれぞれ、材料の線吸収係数と密度である。したがって、侵入深さ d は式(3)で表わされる。本報では $I_{(d)} / I_1$ が 0.9 となる深さを X 線侵入深さとした。侵入深さ d は入射角 ω 、回折角 θ で表すことができる。なお、回折面は $\gamma\text{-Fe}$ の 200 面の回折角 $2\theta = 80^\circ$ からの回折 X 線を検出し計測を行った。

供試材には調質したオーステナイト系ステンレス鋼 SUS316L (JIS G 4305)を用いた。表面処理は研削加工および CNS (住友 3M)、円盤型砥石 (日本 RESIBON, 以下 Disc) による研磨処理を行った。また、Disc 仕上げを施した後に伴水噴流水中キャビテーション噴流を用いた CSP 処理を施した試験片を含め、計 4 種類の平面曲げ疲労試験片を用意した。CSP 処理は、高速水噴流のノズル直径 2 mm、噴射圧力 30 MPa、低速水噴流のノズル 50 mm、噴射圧力 0.02 MPa、処理速度 30 mm/min で行った。生じた残留応力

Fig. 2 X-ray path and absorption in a sample

Fig. 3 Direction of coordinates on the specimen

は表面から 1~8 μm の深さにおいて、1 μm ごとに 2D 法により測定した。計測の際の座標軸は加工痕に対して用いて図 3 のように定義した。なお、X 線発生には Cr 管球を用い、特性 X 線は $K\alpha$ 線を使用し、管電流、管電圧は 40 mA、35 kV とした。

3. 実験結果および考察

未処理試験片、研削加工、CNS、Disc による研磨処理、および Disc 仕上げを施した後に CSP 処理を施した SUS316L 平面曲げ試験片長手方向の表面粗さを図 4 に、極表面層に生じた残留応力の計測結果を図 5 に示す。極表面層の残留応力計測に加え、平面曲げ疲労試験を 10^7 回まで行い、得られた $S-N$ 線図を図 6 に示す。なお疲労強度の推定には Little の方法⁽⁵⁾を用いた。図 5 より、極表面層での残留応力は圧縮残留応力が大きい順に、未処理試験片、Disc + CSP 試験片、CNS 試験片、研削試験片、Disc 試験片である。一方、図 6 より、疲労強度が大きい順に、CNS 試験片、Disc + CSP 試験片、研削試験片、未処理試験片、Disc 試験片となっている。さらに、図 4 より、表面粗さが小さい順に、未処理試験片、CNS 試験片、研削試験片、Disc 試験片、Disc + CSP 試験片となっており、疲労強度に及ぼす表面粗さの影響は極表面層の残留応力に比べ、極めて小さいといえる。

図 5 および図 6 より、CNS 試験片では、深さ 3 μm において若干の引張残留応力が存在しているものの、深さの増加に伴い減少していき、深さ 8 μm では 700 MPa を超える圧縮残留応力が存在していることから、深い位置での大きな圧縮残留応力の働きが極表面層の若干の引張残留応力の影響を補ったため、疲労強度が 408 MPa と最も高くなったと考えられる。また、未処理試験片は極表面層に圧縮残留応力が存在しているにも関わらず疲労強度が CNS 試験片、研削試験片、Disc + CSP 試験片に比べて小さいが、この要因としては、調質材の粗大な結晶粒が機械加工により微細化したことが挙げられる。

研削試験片、Disc 試験片、および Disc + CSP 試験片の

Fig. 4 Surface roughness of treated specimens

Fig. 5 Residual stress in sub-surface generated by surface treatment

Fig. 6 Difference of fatigue strength by surface treatment

深さ 8 μm における残留応力が同程度であるのに対し、疲労強度に大きな差異が生じていることから、この大きな差異の支配的な要因の一つに極表面層の残留応力を挙げることができる。特に、Disc 試験片の極表面層には約 1900 MPa の著しく大きな引張残留応力が存在しており、加えて疲労強度が 231 MPa であるのに対し、CSP 処理を行うだけで極表面層に約 200 MPa の圧縮残留応力を導入することができ、疲労強度が約 52 % 増加し、350 MPa に向上した。

4. 結 言

SUS316L に表面処理を施すと極表面層の残留応力に大きな差異が生じ、この差異が疲労強度に大きな影響を与え、一般的には計測が困難な極表面層に圧縮残留応力を導入することで疲労強度が飛躍的に向上した。

なお本研究の一部は日本学術振興会科学研究費補助金 [基盤研究(A) 20246030] によったことを記す。

参考文献

- (1) 日本材料学会, X 線応力測定標準, JSMS-SD-5-02 (2002).
- (2) B.B.He and K.L.Smith, *Proc. 1998 SEM Spring Conf. Exp. Appl. Mech.*, (1998), 217.
- (3) 佐野ほか 7 名, 日本材料学会 第 55 期学術講演会講演論文集, (2006), 242.
- (4) H. Soyama, et al., *J. Mater. Sci.*, 43 (2008), 5028.
- (5) R.E. Little, ASTM-STP-511 (1972), 29