き裂状欠陥を有する配管材料の疲労強度に及ぼす 過大予荷重の影響

大瀬戸紘子^{*1}, 高橋宏治^{*2}, 安藤柱^{*2}

Effects of Overload on Fatigue Strength of SUS316 Having a Crack-like Surface Defect

Hiroko OSEDO^{*3} and Koji TAKAHASHI and Kotoji ANDO

^{*3} Yokohama National University

79-5 Tokiwadai, Hodogaya-ku, Yokohama, 240-8501 Japan

The effects of overload on the fatigue strength and threshold stress intensity factor range (ΔK_{th}) of SUS316 were studied. Tensile or compressive overload were applied to the bending fatigue test specimens with a small crack-like surface defect and fatigue tests were carried out to determine the fatigue limit and ΔK_{th} . It was found that the ΔK_{th} increased by tensile overloading. The increasing rate of ΔK_{th} in the CT specimen is larger than that in the bending fatigue test specimen. Thus, the crack size effects on the improvement of ΔK_{th} after overloading were observed. The results are discussed from the viewpoint of fracture mechanics.

Key Words : Overload, Surface defect, Fatigue limit, Stress intensity factor range

1. 緒言

原子力発電プラントでは高度な安全性および信頼性が要求される。原子力発電プラントの主要構成要素の一つである配管系では、振動および地震などにより繰返し応力が発生する。繰返し応力により表面き裂が発生した場合には、き裂長さや負荷応力に依存して、部材の信頼性が低下する可能性がある。そのため原子力発電プラントでは、定期検査として、非破壊検査が行われている。しかし、非破壊検査後にも検出限界寸法未満の微小き裂が存在する可能性があり、機器の信頼性に影響を及ぼす場合がある。

配管などの部材が地震荷重を受けた場合、この部材は過大予荷重を受けることになる。金属材料に引張の過大予荷重が作用した場合には、疲労き裂の進展が抑制されることが知られている。この現象は、過大予荷重効果と呼ばれ、数多く研究されている。過去の研究で、原子力発電プラントの配管材料として使用されるステンレス鋼 SUS316 の巨視き裂材における下限界応

力拡大係数範囲 ΔK_{th} が過大予荷重効果により向上することが明らかにされている⁽¹⁾。また、高強度鋼 HT540 の巨視き裂材および微小き裂材⁽²⁾についても同様の結果が得られている。しかし、ステンレス鋼 SUS316 の微小き裂材における過大予荷重効果については十分には明らかにされていない。

したがって、本研究では、き裂状微小欠陥を有するステンレス鋼の疲労強度に及ぼす過大予荷重の影響評価を目的とし、き裂状微小欠陥を有するステンレス鋼 SUS316 の試験片に過大予荷重を負荷した後、平面曲げ疲労試験を行った。その結果を、ステンレス鋼や高強度鋼の巨視き裂材や、高強度鋼の微小き裂材と比較し、き裂寸法や降伏応力の影響を評価した。

2. 実験方法

2・1 供試材 本研究では、供試材として、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 を用いた。この材料の 0.2%耐力および引張り強さは、それぞれ 321MPa 及び 631MPa である。

2・2 疲労試験方法 き裂状微小欠陥を有する試験片の疲労限度および ΔK_{th} に及ぼす過大予荷重の影響

^{*1} 学生員, 横浜国立大学大学院 (〒240-8501 横浜市保土ヶ谷区常盤台 79-5)

^{*2} 正員, 横浜国立大学。

E-mail: d10ga607@ynu.ac.jp

を調査した。図1に平面曲げ疲労試験片を示す。また、図2に示すような深さ0.3mmの半円スリットを放電加工により、試験片中央部に導入した。このスリット寸法は、過去の研究⁽¹⁾で用いた巨視き裂材(CT試験片)に導入したき裂長さ13mmと比較して小さいことから、微小き裂とみなした。平面曲げ疲労試験機を用いて、室温大気中で疲労試験を行った。実験条件は、応力比 $R=0$ 、周波数20Hzとした。

過大予応力は4点曲げにより負荷した。スリット部に400MPaの引張過大予応力、および-250MPaの圧縮過大予応力を負荷した。過大予荷重を負荷しない場合の実験も同様に行った。

Fig.1 Shape and dimension of bending fatigue test specimen

Fig.2 Shape of artificial surface defect

3. 疲労試験結果

図3にS-N曲線を示す。図中の→印は非破断の試験片を示す。疲労限度は 10^7 回の繰返しに耐えた最大の公称応力として定義した。引張過大予応力を負荷した場合、負荷しなかったものに比べ疲労限度は10MPa向上した。このとき、疲労限度向上率は10%である。また、圧縮過大予応力を負荷した場合、負荷しなかったものに比べ疲労限度は変化しなかった。

き裂を有する部材に対して引張過大予応力の負荷および除荷を行った場合、除荷後には図4に示すようにき裂先端に圧縮残留応力場が生じる。一方、圧縮過大予荷重の負荷および除荷を行った場合には、き裂先端に引張残留応力場が形成される。応力比 $R=0$ の場合には、疲労試験時の負荷応力は引張となるため、引張過大予荷重により導入された圧縮残留応力場は減衰しないが、圧縮過大予荷重により導入された引張残留応力は減衰すると考えられる。そのため、引張過大予荷重を負荷した場合には疲労限度が向上したが、圧縮過大予荷重を負荷した場合には疲労限度が変化しなかったと考えられる。

4. 考察

ステンレス鋼 SUS316($\sigma_{0.2}=321\text{MPa}$)と高強度鋼 HT540($\sigma_{0.2}=1200\text{MPa}$)において、過大予荷重が ΔK_{th} に及ぼす影響の比較を行った。

4・1 巨視き裂材における K_{Ov} と ΔK_{th} の関係 図5に、ステンレス鋼⁽¹⁾および高強度鋼⁽²⁾の巨視き裂材(CT試験片)について、過大予荷重による応力拡大係数 K_{Ov} と見かけの ΔK_{th} の関係を示す。図中の○印および△印は、それぞれ、ステンレス鋼および高強度鋼のCT試験片における実験結果を示す。両材料ともに、見かけの ΔK_{th} は K_{Ov} の向上とともに向上した。 K_{Ov} による見かけの ΔK_{th} の向上は材料の降伏応力に依存しないことが明らかである。

4・2 過大予荷重効果により向上する見かけの ΔK_{th} の予測 図4に、過大予荷重負荷時、および除荷後の応力分布の模式図を示す。図中に示す圧縮残留応力場内にき裂先端がある場合、き裂は遅延、または停止すると考えられる。き裂先端がこの圧縮残留応力場内を超えると、き裂は進展すると考えられる。

この圧縮残留応力による応力拡大係数範囲 K_R を考慮すると、見かけの ΔK_{th} は以下のように与えられる。

$$\Delta K_{th} = \Delta K_{eff.th} - K_R \quad (1)$$

ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数範囲[MPa $m^{1/2}$]

$\Delta K_{eff.th}$: 下限界有効応力拡大係数範囲
[MPa $m^{1/2}$]

K_R : 残留応力による応力拡大係数[MPa $m^{1/2}$]

K_R は式(2)より算出できる。

$$K_R = - \int_c^{c+\omega_R} \frac{2\sigma_y \sqrt{\pi(c+\omega_R)} \{1+f(\xi)\}}{\pi \sqrt{(c+\omega_R)^2 - x^2}} dx \quad (2)$$

$$\xi = x / (c + \omega_R)$$

$$f(\xi) = (1 - \xi^2)(0.2945 - 0.3912\xi^2 + 0.7685\xi^4 - 0.9942\xi^6 + 0.5094\xi^8)$$

c : 初期き裂長さ[m]

σ_y : 降伏応力[MPa]

ω_R : 圧縮残留応力場寸法[m]

図4中の破線は(1)式をもとに算出した予測線である。ステンレス鋼および高強度鋼において予測線と実験値が一致したことより、巨視き裂材における見かけの ΔK_{th} は、材料の降伏応力に依らず式(1)より予測できる。

4・3 微小き裂材における K_{Ov} と ΔK_{th} の関係 図5中の●印および▲印は、それぞれステンレス鋼および高強度鋼⁽²⁾の微小き裂材における K_{Ov} と ΔK_{th} の関係

を示す。半円スリットは半円き裂と等しいと仮定して、Newman-Raju の式⁽³⁾を用いて K_{OV} および ΔK_{th} を算出した。4・1で述べたように、巨視き裂材においては、両材料の ΔK_{th} は同様に向上した。しかしながら、微小き裂材においては、両材料の ΔK_{th} の向上率は巨視き裂材の場合に比べて小さくなった。さらに、高強度鋼の場合と比較して、ステンレス鋼の微小き裂材では ΔK_{th} の向上幅が小さかった。

ΔK_{th} は K_{OV} の増加につれて増加した後、飽和点に達することが知られている⁽¹⁾。飽和点はき裂長さ、および σ_y (または $\sigma_{0.2}$)に依存するという解析結果が得られている⁽¹⁾。平面曲げ疲労試験片に導入したスリットの寸法は深さ0.3mmであり、CT試験片におけるき裂長さ13mmと比較して小さい。また、ステンレス鋼の0.2%耐力は $\sigma_{0.2}=321\text{MPa}$ であり、高強度鋼の値($\sigma_{0.2}=1200\text{MPa}$)よりも小さいため、負荷できる K_{OV} の値も高強度鋼の値よりも小さくなる。以上のことから、高強度鋼と比較して、ステンレス鋼では、見かけの ΔK_{th} の向上幅が小さくなったと考えられる。

Fig. 3 S-N curve for SUS316 having small crack-like surface defect

Fig. 4 Stress distribution at crack tip

Fig. 5 Relationship between ΔK_{th} and K_{OV}

5. 結言

ステンレス鋼 (SUS316) のき裂材について、疲労限度および見かけの下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} に及ぼす過大予荷重の影響を調査した。

- (1) 微小き裂材の疲労限度は、引張過大予荷重により10%程度向上したが、圧縮過大予荷重による変化は見られなかった。
- (2) ステンレス鋼および高強度鋼において、巨視き裂材の ΔK_{th} は、引張過大予荷重による応力拡大係数 K_{OV} の増加とともに向上した。また、予測値と実験値が一致した。
- (3) 微小き裂材における ΔK_{th} の向上率は巨視き裂材と比較して小さくなることが分かった。
- (4) 微小き裂では、ステンレス鋼における ΔK_{th} の向上幅が高強度鋼と比較して小さかった。これは、負荷できる K_{OV} は降伏応力に依存し、ステンレス鋼では、高強度鋼と比較して小さいためである。

謝辞

本研究は経済産業省・平成20~22年度「革新的実用原子力技術開発費補助金」事業の一環として実施された。ここに記して謝意を表す。

参考文献

- (1) Y. Hashikura, K. Takahashi, Y. Miyazaki, K. Houjou, K. Ando, Int.J. Structural Integrity, 1, 1, PP.43-51 (2010)
- (2) K. Hanaori, H. Mizugami, K. Takahashi, K. Ando, Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 76, No. 764, (2010), pp. 389-391
- (3) Newman, J. C. Jr, Raju, I. S., Eng. Fract. Mech. Vol.15, (1981), pp. 185-192