

応力比がSUS316の過大荷重効果に与える影響

北條 恵司*1, 荒井 雄太*2, 柴田 佳英*2, 西野 容*2

Effect of Stress Ratio on Overload Effect of SUS316

Keiji HOUJOU, Yuuta ARAI, Yoshihide SHIBATA, Iruru NISHINO

This paper describes the effects of stress ratio on the ΔK_{th} improved by overload. Stainless steel SUS316 was prepared as test materials. Tensile overload was applied to compact tension specimen, subsequently fatigue tests were carried out at stress ratio $R=0.5$. The main conclusions are as follows; (1) The value of ΔK_{th} increased with increasing of the tensile overload. (2) The improvement of ΔK_{th} depended on the stress ratio. (3) Effect of overload improves the fatigue limit of material with crack, which improves safety and reliability.

KEYWORDS : Stress Intensity Factor, Threshold, Fatigue, Over Load, Crack Propagation, Stress Ratio, SUS316

1. まえがき

単一の過大引っ張り荷重を負荷すると疲労き裂の進展が遅延または停留する現象が知られている。これは過大荷重によりき裂先端に圧縮の残留応力が形成されることに起因している。Fig.1 にき裂先端に生じる応力分布の模式図を示す。過大荷重を負荷されるときき裂先端は ω_{ov} の範囲で材料は降伏し、続いて除荷すると逆降伏により ω_r の範囲に圧縮の降伏応力相当の残留応力が発生し、これがき裂進展に対する抵抗因子になる。現在これらに関して多くの研究例が報告されている。たとえば過大荷重の大きさの影響、材料特性の影響など研究範囲は広い^{1)~3)}。しかし下限界応力拡大係数範囲 ΔK_{th} の向上に主眼をおいた研究例は必ずしも多いとは言えない。著者らはこの ΔK_{th} に着目し、 ΔK_{th} はどこまで向上するのか、過大荷重との

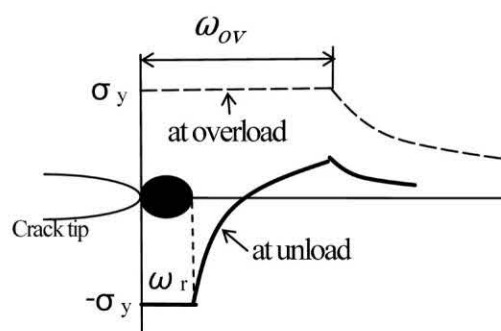


Fig.1 Schematic illustration of stress distribution

関係はいかなるものなのか、何によって ΔK_{th} の向上は決定されているのか、さらに過大荷重による ΔK_{th} 向上の定量的説明などの調査研究を行ってきた^{2), 3)}。これらの研究において、疲労試験の応力比は主に $R=0.1$ で試験を行ってきた。しかしばね、建築物の梁、圧力容器など高応力比で使用される部材は多く、過大荷重効果の応力比依存性を調査することは工業的に有益である。小川らは

*1 機械工学科(Dept. of Mechanical Engineering), E-mail: houjou@oyama-ct.ac.jp

*2 機械工学科5年(Student of Mechanical Engineering)

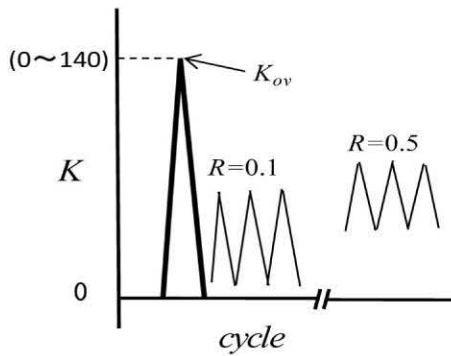


Fig. 2 Load history of fatigue test

過大荷重履歴を受けたとき裂の進展挙動は、応力比の影響が大きいことを指摘している¹⁾。しかし既往の研究において応力比が過大荷重による ΔK_{th} の向上率にどのような影響を及ぼしているのか、それは材料特性に依存するのかなどについての系統的な研究例は見当たらない。

そこで本稿では、疲労試験における応力比が、過大荷重による ΔK_{th} の向上にどのような影響を及ぼすのかを詳細に調査したので報告する。

2. 実験方法

2. 1 供試材

準備した材料は、オーステナイト系ステンレス鋼 SUS316 で、0.2%耐力および引張り強度はそれぞれ、286MPa および 571 MPa である。

ここから L-T 方向に切り出し、板厚 12.5mm の 1 インチ CT 試験片を作成した。ただし低過大荷重側において、小規模降伏条件を満たす範囲内で一部 1/2 インチ試験片を使用した。切り欠き先端には $\phi 0.1$ mm のワイヤー放電加工により長さ 4mm のスリットを導入した。

2. 2 実験方法

試験した過大荷重履歴の模式図を Fig. 2 に示す。試験に先立ち、単一の引っ張り過大荷重を負荷した。その上限値は K_{IC} により決定され、最大の K_{ov} は 120 MPam^{1/2}であった。完全除荷したのちに荷重一定制御、応力比 $R=0.5$ で疲労試験を実施した。試験は油圧式サーボ疲労試験機を使用し、室温大気中で行った。周波数は 20Hz 正弦波で、繰返し数は 2×10^6 回まで破断しなかった場合は

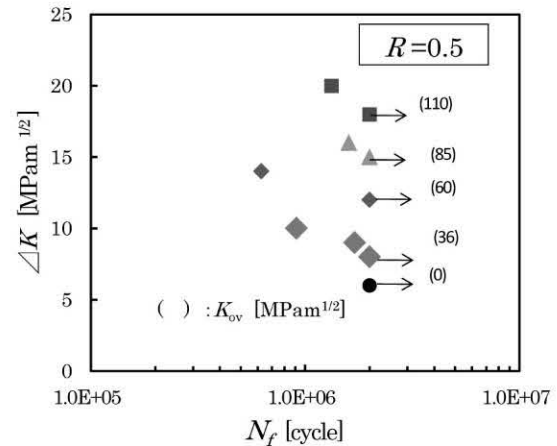


Fig. 3 Results of fatigue test

試験を打ち切り、このときの応力拡大係数範囲 ΔK の最大値を ΔK_{th} と定義した。

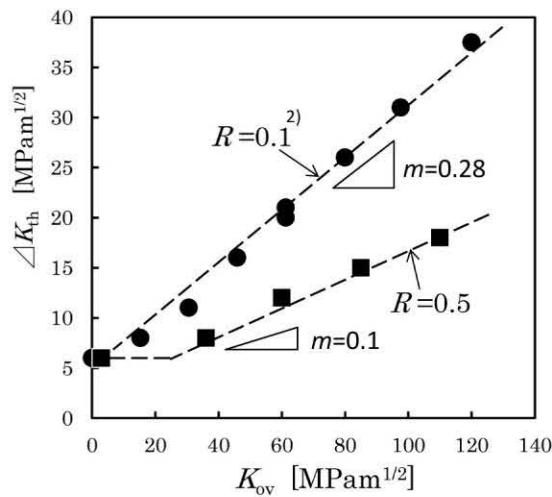
3. 実験結果

3. 1 疲労試験結果

Fig. 3 に疲労試験結果を示す。矢印(→)は繰返し数 2×10^6 回まで未破断で試験を打ち切ったことを表している。また()内の数値には、試験前に負荷した過大荷重により発生した応力拡大係数 K_{ov} の値を記している。過大荷重効果を確認するために、 $K_{ov}=0$ の試験(●印)を行った。いずれの試験結果を見ても、 ΔK_{th} は K_{ov} の増加とともに向上していることがわかる。 $K_{ov}=0$ の ΔK_{th} の値が 6.0 MPam^{1/2}であったのに対して、 $K_{ov}=120$ の場合は 18 MPam^{1/2}であった。結果として、 ΔK_{th} の値は 3 倍の向上が得られた。

3. 2 過大荷重効果の応力比依存性

Fig. 4 に K_{ov} と ΔK_{th} の関係をそれぞれ示す。図中●印は応力比 $R=0.1$ を、■印は応力比 $R=0.5$ をそれぞれ示している。 $K_{ov}=0$ つまり過大荷重を負荷しない場合、 ΔK_{th} は応力比の影響をほとんど受けずに一定値 $\Delta K_{th}=6.0$ MPam^{1/2}を示した。しかし K_{ov} が増加するにつれて応力比の影響は顕著となり、応力比 R が大きいほうが ΔK_{th} の向上率は小さかった。いずれの応力比においても K_{ov} と ΔK_{th} の関係はほぼ正比例の関係にあった。図中の三角形と m はその傾きを表している。 m は $R=0.1$ (●)


 Fig. 4 Relation between K_{OV} and ΔK_{th} .

のほうが大きく、はおよそ $m=0.28$ であった²⁾。一方、 $R=0.5$ (■) では傾きは半分以下になり $m=0.1$ であった。

この理由を明らかにするために、Fig. 1 に過大荷重を負荷した際のき裂先端部の応力分布、及び除荷した際の残留応力分布を、それぞれ破線及び実線で示す。破線は塑性域寸法 ω_{OV} 、実線は圧縮残留応力場寸法 ω_r を示し、完全弾塑性体で平面ひずみの場合、それぞれ次式で表される。

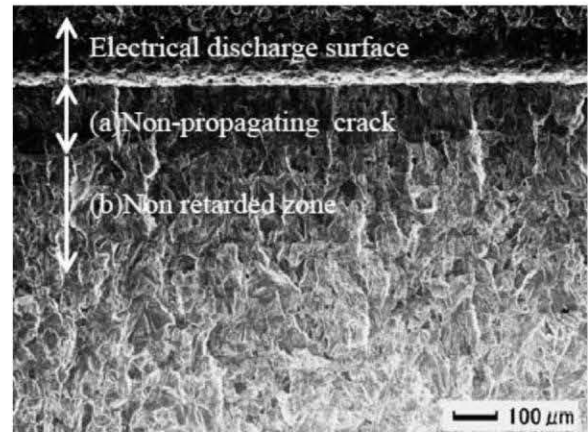
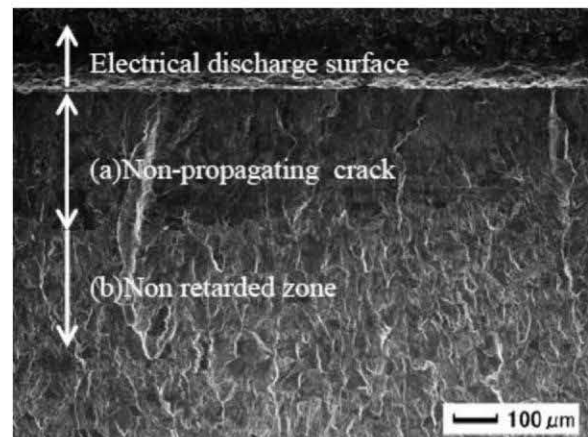
$$\omega_{OV} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{OV}}{\alpha \cdot \sigma_y} \right)^2 \quad (1)$$

$$\omega_r = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{OV}}{2\alpha \cdot \sigma_y} \right)^2 \quad (2)$$

き裂先端が圧縮残留応力場中に存在するとき、き裂先端の応力拡大係数レベルが低下するため、き裂は遅延あるいは停留すると考えられ、き裂先端がこの領域を超えた場合、き裂は進展すると考えられる。したがって、Fig.4 に示すように K_{OV} が増加するにつれて、 ΔK_{th} が向上したと考えられる。

3. 3 SEMによる破面観察

Fig.5 には、 $K_{OV} = 30.6 \text{ MPam}^{1/2}$ 、 $\Delta K_{th} = 11.0 \text{ MPam}^{1/2}$ の、Fig.6 には、 $K_{OV} = 45.9 \text{ MPam}^{1/2}$ 、 $\Delta K_{th} = 16.0 \text{ MPam}^{1/2}$ の試験片の SEM による破面観察の結果を示す。き裂先端から (a) の領域は停留き裂であり、それ以降の (b) の領域は強制破断させた破面である。Fig.6 に、 K_{OV} と ω_r 及び試験


 Fig.5 SEM image ($K_{OV}=30.6 \text{ MPam}^{0.5}$, $\Delta K_{th}=11 \text{ MPam}^{0.5}$, tested on $R=0.1$)

 Fig.6 SEM image ($K_{OV}=45.9 \text{ MPam}^{0.5}$, $\Delta K_{th}=16 \text{ MPam}^{0.5}$, tested on $R=0.1$)

片中央部で測定したき裂長さの関係を示した。これらより、破断に至らなかった試験片のき裂は圧縮残留応力場の中で停留しているということが明らかとなった。

4. あとがき

オーステナイト系 SUS316 の CT 試験片を用いて、試験応力比が過大荷重効果に与える影響を研究したところ次のような結論が得られた。

(1) いずれの応力比でも引っ張りの過大荷重を負荷することにより、 ΔK_{th} の向上がみられ、 $R=0.5$ の場合最大で3倍の向上が得られた。

(2) ΔK_{th} の向上は K_{OV} に対して比例の関係にあった。応力比が大きいほど ΔK_{th} の向上率は小さくなり、 $R=0.1$ で比例定数は 0.28、 $R=0.5$ で 0.1 であった。両者の関係は、応力比に大きく依存していた。

(3) 疲労試験で疲労限度を示した試験片の破面を観察したところ、き裂は K_{ov} 負荷により生成された圧縮残留応力場の中で停留していた。

参考文献

- 1) 小川武史, 戸梶恵郎, 越智聡, 小林英男 “疲労き裂進展の下限界に及ぼす荷重履歴の影響” 日本機械学会論文集(A 編) 53 巻 487 号 (1987)
- 2) Yasuaki Hashikura, Keiji Houjou, Yuji Miyazaki, Koji Takahashi, Kotoji Ando. Effect of overload on the fatigue threshold stress intensity factor range (ΔK_{th}) of SUS316, Journal of High Pressure Institute of Japan ,Vol47, No. 5, (2009), pp314-320
- 3) 北條恵司, 高橋宏治, 安藤柱過大荷重がA7075 の下限界応力拡大係数範囲に及ぼす影響高圧力技術協会, VOL.48-2, pp30-37 (2010)

【受理年月日 2011年 9月27日】