



Title	単一過大荷重を受ける疲労き裂の伝ば挙動に及ぼす負の応力比の影響について
Author(s)	宮崎, 達二郎; Purnowidodo, Anindito; 真壁, 朝敏
Citation	日本機械学会論文集. A編 = Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers. A, 70(700): 51-58
Issue Date	2004-12-25
URL	http://hdl.handle.net/20.500.12000/138
Rights	Copyright (c) 2004 日本機械学会

単一過大荷重を受ける疲労き裂の伝ば挙動に及ぼす 負の応力比の影響について*

宮崎 達二郎^{*1}, Anindito PURNOWIDODO^{*2}, 眞壁 朝敏^{*1}

Effect of Negative Stress Ratio on Fatigue Crack Propagation Behavior after Single Tensile Overload

Tatsujiro MIYAZAKI^{*3}, Anindito PURNOWIDODO and Chobin MAKABE

^{*1,2,3} Department of Mechanical Systems Engineering, Faculty of Engineering, University of the Ryukyus,
1 Senbaru, Nishihara, Nakagami gun, Okinawa, 903-0213 Japan

It is well known that a single tensile overload applied during constant amplitude cycling at a positive stress ratio causes the crack growth retardation. In a case of a negative stress ratio R , however, the fatigue crack growth rate actually accelerated after a tensile overload. This crack propagation behavior is related to the local bulging of specimen thickness, the blunting behavior of crack tips and the residual stress distributions. When the crack tips were blunted during tensile overload and the succeeding compression stress with a high value was applied after the overload, the crack propagation rate got higher level than that before the overload application. In this case, a tensile residual stress was created in front of the crack. To investigate the effect of the negative stress ratio on the fatigue crack propagation, the fatigue tests under $R=0, -1$ and -1.5 applying the single tensile overload were performed using annealed 0.15% carbon steels. In the present study, a residual life after an overloading was specially investigated, and it was found that the transition phenomenon of the residual life was appeared in the case of the negative stress ratio.

Key Words: Fatigue Crack Propagation, Overload, Stress Ratio, Retardation, Acceleration, Blunting of Crack Tips, Residual Stress

1. 結 言

一定応力振幅下で安定的に伝ばしている疲労き裂に単一過大荷重を負荷すると、き裂の伝ばが遅延することはよく知られている^{(1)~(10)}。この遅延現象は、過大荷重によって生じた静的塑性域において生じる圧縮の残留応力場をき裂が進展するためであり、応力比⁽³⁾、試験片板厚^{(4)~(6)}、材料強度⁽⁷⁾などの影響を受ける。特に、試験片板厚が薄い場合に遅延効果は大きく、過大荷重比は遅延期間に影響を及ぼす。

しかしながら、応力比、過大荷重の大きさなど単一過大荷重の負荷条件によっては、き裂伝ばが加速する場合もある。例えば、眞壁ら^{(6)~(11)}は、応力比 $R = \sigma_{min}/\sigma_{max}$ (σ_{min} , σ_{max} はそれぞれ一定応力振幅下でのき裂伝ばにおける繰返し最小応力および最大応力) が -1.5 で伝ばしているき裂に、その先端が著しく鈍化する程のレベルの過大応力を負荷すると、そ

の後のき裂伝ばが加速する場合があることを報告している。加速現象については、過大荷重負荷によるき裂先端の残留応力、板厚変化などの要因が考えられる。眞壁ら⁽¹¹⁾は、過大荷重負荷前後でのき裂先端の板厚変化を詳細に観察し、その結果を用いてき裂先端での残留応力分布に基づいた過大荷重負荷直後のき裂伝ば挙動のメカニズムについて検討を行っている。しかしながら、き裂伝ばの加速現象については不明な点も残されており、定量的に取扱うまでには至っていない。また、それらの研究では炭素鋼 S35C を用いて検討を行っているが、一般的にき裂伝ばの加速現象に関する基本的なデータは少なく、今後、定量的評価を行うためにも、他の材料でも実験する必要がある。

そこで本研究では、S15C を用いて過大荷重を受けるき裂の伝ば挙動に及ぼす過大荷重の大きさ、および基本負荷サイクルの影響について検討を行った。具体的には、後述のき裂長さ $2a$ から破断時までには要する繰返し数を余寿命として、過大荷重の負荷条件による余寿命の変化に着目し、過大荷重の大きさおよび基本負荷サイクルの条件を変化させながら、き裂伝ばと負荷

* 原稿受付 2004年3月22日。

^{*1} 正員、琉球大学工学部(〒903-0213 沖縄県中頭郡西原町千原1)。

^{*2} 正員、琉球大学大学院理工学研究科。

E-mail: t-miya@tec.u-ryukyu.ac.jp

Table 1 Chemical composition (mass %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
0.15	0.30	0.50	0.013	0.013	0.05	Bal.

Table 2 Mechanical properties

σ_{el}	σ_B	σ_T	ϕ
283	449	956	69

σ_{el} : Lower Yield Stress (MPa) σ_B : Ultimate Tensile Strength (MPa)
 σ_T : True Fracture Stress (MPa) ϕ : Reduction of Area (%)

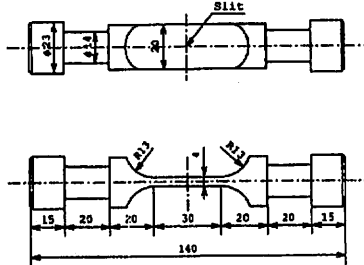


Fig. 1 Specimen configurations

履歴の関連について検討を行った。なお、本研究では、基本負荷サイクルの応力比 R が負の場合に着目して検討を行っている。

2. 使用材料、試験片の形状および実験方法

供試材には、JIS 機械構造用炭素鋼 S15C の焼鈍し材 (904°C 焼鈍) を用いた。その化学成分を表 1、機械的性質を表 2 に示す。

図 1 に試験片の形状を示す。試験部中央には、長さ $2t = 2.5$ mm、先端半径 $\rho = 0.2$ mm のスリットを加工し、そこから予き裂を導入して中央き裂試験片とした。スリット長さを含めた予き裂長さは $2a_0 = 3$ mm である。予き裂導入後、600°C で 1 時間の真空焼鈍を行った。き裂伝ば試験においては、基本負荷サイクル試験を一定応力振幅 σ_a 、繰返し速度 10 Hz の条件で行った。過大荷重 σ_{OL} は、き裂半長が $a = 3$ mm となった時点で、一定応力振幅のき裂伝ば試験を中断し手動により負荷した。また、過大荷重の有無やその負荷条件の変化による余寿命の違いを比較するため、本研究ではき裂半長 $a = 3$ mm から破断までの繰返し数を余寿命とした。

図 2 に負荷サイクルの模式図を示す。表 3 に実験条件を示す。一部の試験においては、過大荷重を負荷する以前の疲労荷重履歴が、その後のき裂伝ば挙動に及ぼす影響を調べるために、過大荷重負荷前後で基本負荷サイクルの条件を変化させた。図 2 に示す

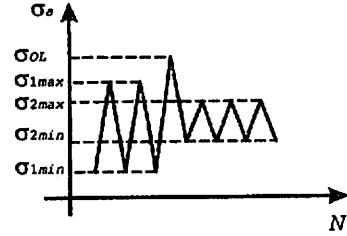


Fig. 2 Schematic illustration of the pattern of stress cycles (σ_{1max} , σ_{1min} are maximum and minimum cyclic stress before overload, respectively; σ_{2max} , σ_{2min} are maximum and minimum cyclic stress after overload, respectively; σ_{OL} is overload level)

Table 3 Fatigue testing condition

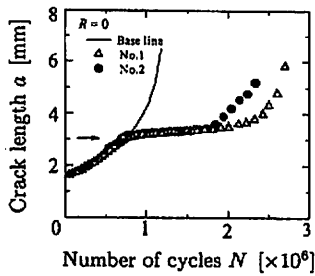
Specimen Number	σ_{1max} [MPa]	σ_{1min} [MPa]	σ_{2max} [MPa]	σ_{2min} [MPa]	σ_{OL} [MPa]	R_1 [-]	R_2 [-]
1	86	0	86	0	163	0	0
2	86	0	86	0	185	0	0
3	67	-67	67	-67	170	-1	-1
4	67	-67	67	-67	185	-1	-1
5	67	-101	67	-101	135	-1.5	-1.5
6	67	-101	67	-101	160	-1.5	-1.5
7	67	-101	67	-101	170	-1.5	-1.5
8	67	-101	67	-101	178	-1.5	-1.5
9	86	0	67	-101	178	0	-1.5
10	67	-101	86	0	178	-1.5	0

ように σ_{min} 、 σ_{max} および R に付した下付添字 1、2 は、それぞれ過大荷重を負荷する前、後を表す。試験片 No.1~8 については、同一負荷条件の一定応力振幅の疲労試験の途中で単一の引張り過大荷重を負荷した。なお、No.7 の試験条件および後述の試験結果は、No.8 とほぼ同じであったので、No.8 で代表させた。No.9、10 については、単一過大荷重を負荷した前と後で応力比 R および応力振幅 σ_a を変化させた。つまり、応力比 R については、No.1~8 の場合では $R_1 = R_2$ 、No.9 および 10 の場合では $R_1 \neq R_2$ となる。

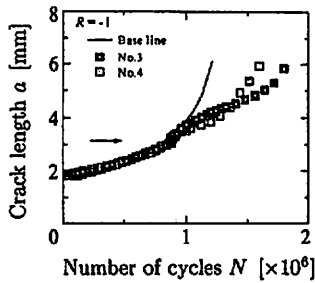
3. 実験結果および考察

3-1 過大荷重負荷後のき裂伝ば挙動

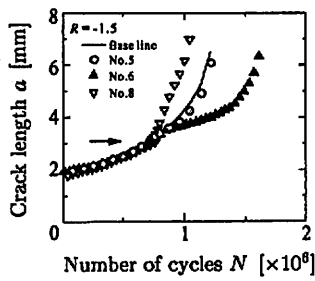
3-1-1 過大荷重負荷前後で負荷条件が等しい場合
 図 3 に試験片 No.1~6、8 のき裂伝ば曲線、すなわち、き裂半長 a と繰返し数 N の関係を示す。矢印は過大荷重を負荷した点、実線は過大荷重を負荷しない基本的なき裂伝ば曲線である。図 4 にき裂伝ば速度 da/dN とき裂半長 a の関係を示す。実線は過大荷重を負荷し



(a) $R_1 = R_2 = 0$



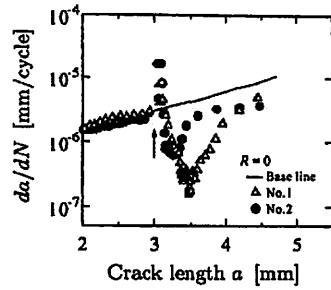
(b) $R_1 = R_2 = -1$



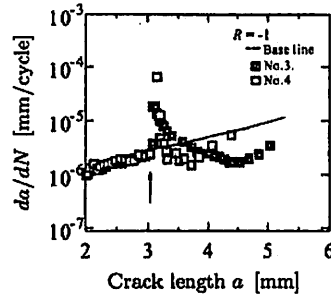
(c) $R_1 = R_2 = -1.5$

Fig. 3 Relation between crack length a and number of cycles N

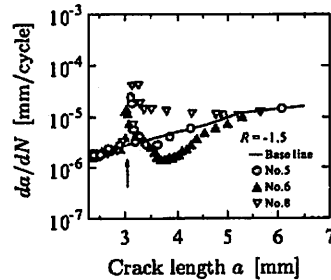
ない基本的なき裂伝ば速度である。No.1~6, 8 についての場合は、通常行われているように過大荷重負荷前後で同一負荷条件の一定応力振幅の疲労試験を行っている。応力比 $R (= R_1 = R_2) = 0$ および -1 では過大荷重を負荷した後、き裂伝ばの遅延現象が観察された。そして、図 3, 4 に示した範囲では、それぞれ過大荷重が大きい場合の方が、過大荷重負荷後の余寿命が短くなっている。 $R = -1.5$ については、No.5, 6 で遅延現象、No.8 で加速現象が観察され、過大荷重の大きさによって異なる傾向のき裂伝ば挙動が観察された。なお、No.7 についても No.8 と同様な傾向の結果が得られた。それぞれのき裂伝ば速度は、遅延期間



(a) $R_1 = R_2 = 0$



(b) $R_1 = R_2 = -1$



(c) $R_1 = R_2 = -1.5$

Fig. 4 Relation between da/dN and a

または加速期間を過ぎると、すべて過大荷重を負荷していない場合のき裂伝ば速度と平行になっている。

なお、真壁らは^{(9)~(11)}は、S35C を用いて同様な実験を行っている。その結果においても、基本負荷サイクルの応力比 R が -1.5 において、単一過大荷重の大きさがある値以上の大きさであると、過大荷重負荷後のき裂伝ばが加速し、余寿命が短くなるという結果を得ている。したがって、試験片の寸法等の問題については、まだ詳細に検討していないが、少なくとも炭素鋼の場合においては、過大荷重の負荷によって、疲労き裂伝ばが遅延する場合だけでなく、加速する場合もあることがわかった。

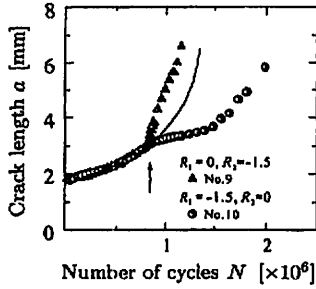
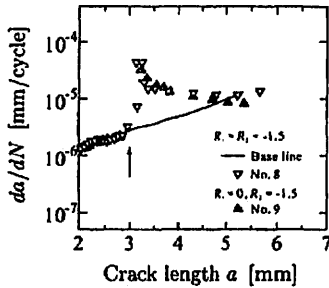
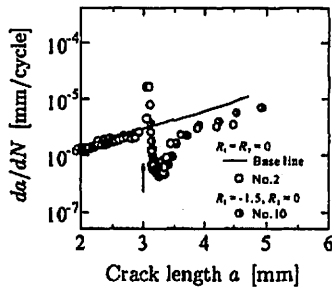


Fig. 5 Relation between a crack length a and number of cycles N



(a) $R_1 = 0, R_2 = -1.5$



(b) $R_1 = -1.5, R_2 = 0$

Fig. 6 Relation between da/dN and a

3.1-2 過大荷重負荷前後で荷重条件を変化させた場合 図5, 6に応力比 R が過大荷重負荷前後で異なる場合について検討したき裂長さ a と繰返し数 N の関係および da/dN と a の関係をそれぞれ示す。矢印で示す過大荷重点の前後で応力比 R は異なり、実線は過大荷重負荷後の基本荷重サイクル (Base line) での関係を示している。No.9の過大荷重負荷以前の応力比 R_1 と最大応力 σ_{1max} はそれぞれ0と86 MPa, No.10はそれぞれ-1.5と67 MPaである。実験条件は異なるが、結果的に、過大荷重負荷以前ではNo.9

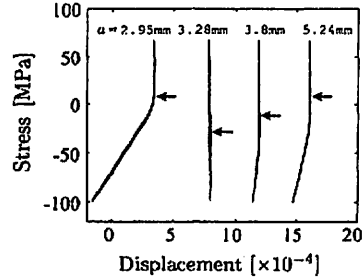


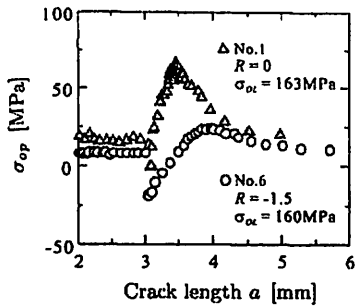
Fig. 7 Relation between stress and displacement of No.8

とNo.10のき裂伝ば曲線はほぼ同じになっている。過大荷重負荷前後で R を0から-1.5へと変化させた場合のNo.9では加速現象、その組合せが逆のNo.10では遅延現象が観察された。これらの結果から、過大荷重負荷後のき裂伝ば挙動には、過大荷重の大きさとその後の繰返し応力条件が関与することがわかる。なお、本実験では応力比 R が0と-1.5の基本荷重サイクルにおいて、それぞれのき裂伝ば曲線がほぼ同じになるような条件について検討した。過大荷重負荷後のき裂伝ば挙動は過大荷重のレベルと過大荷重負荷後の荷重サイクル条件に影響を受けるので、本実験と異なり両応力比において基本的なき裂伝ば曲線が異なる組合せの場合でも、同様な傾向のき裂伝ば挙動が得られることが予想される。

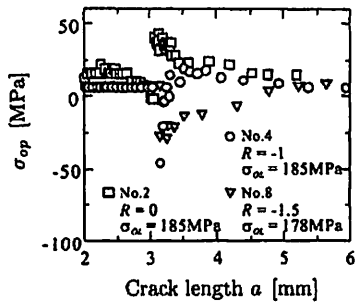
3.2 過大荷重負荷後のき裂開口点の変化と余寿命 き裂伝ば挙動はElber⁽¹²⁾が提案したき裂開口挙動と密接に関係しているので、本研究でもき裂の開口挙動について検討した。図7に除荷弾性コンプライアンス法⁽¹³⁾により測定したき裂開口点の変化する傾向の一例を示す。矢印は、き裂の開口点を指す。このようにして得られた開口点 σ_{op} をき裂半長 a で整理した結果を図8に示す。なお、図8は次に示すき裂先端の状態と対応させて考えるため、過大応力 σ_{OL} のレベルによって、 σ_{op} の変化の傾向を図8(a)と(b)に分けて示してある。このようなき裂開口点の変化は、き裂伝ばに伴うき裂先端の残留応力分布に関わっている⁽¹⁰⁾。

図9に本実験において過大荷重のレベルが高い試験片No.2, 4, 8, 10の場合のき裂伝ば速度 da/dN を $(\Delta K_{eff} - \Delta K_{eff,th})$ で整理した結果を示す。ここで、 ΔK_{eff} は有効応力拡大係数幅、 $\Delta K_{eff,th}$ はその下限値であり、 $\Delta K_{eff,th} = 2.6 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ とした。実線は、図9で示した実験結果の平均的な傾向であり、次式のような関係となった。

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{eff} - \Delta K_{eff,th})^n \quad (1)$$



(a) $\sigma_{OL} = 160, 163 \text{ MPa}$



(b) $\sigma_{OL} = 178, 185 \text{ MPa}$

Fig. 8 Effects of the overload on the variation of σ_{op}

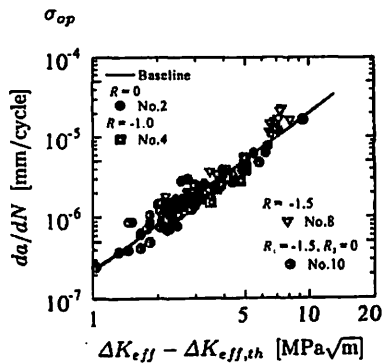


Fig. 9 Relation between da/dN and $\Delta K_{eff} - \Delta K_{eff,th}$

ここで、 C と n は材料定数であり、 $C = 2 \times 10^{-10}$ 、 $n = 2$ である。実験結果は実線に対して若干のばらつきはあるが、過大荷重によって加速するき裂においても、近似的ではあるが、有効拡大係数によるき裂伝ばの評価が有用であることが図9から期待できる。

図10に過大荷重負荷時の最大荷重に達した時点のき裂先端の様子を示す。図8と図10を対応させて考察すると、き裂先端が鈍化しない場合 [図10(a), (d)]

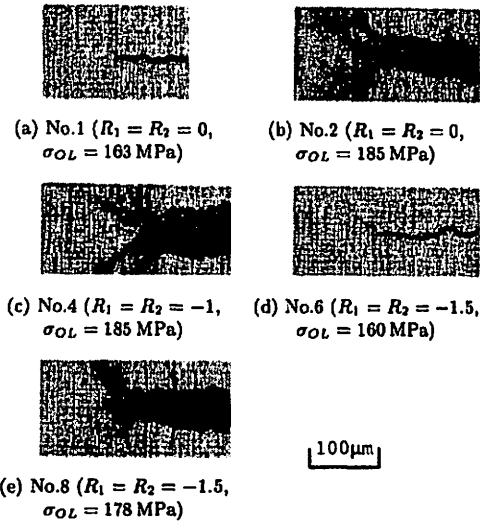


Fig. 10 Comparison of crack opening and closing behavior

には、過大荷重負荷後にき裂開口レベルが上昇し、それがき裂伝ばの遅延に影響していることは明かである。しかしながら、過大荷重によってき裂先端が大きく鈍化した場合 [図10(b), (c), (e)] には、応力比の違いによってき裂伝ばの遅延が生じる場合と生じない場合があり、過大荷重負荷後の応力条件によりき裂伝ばの傾向が異なっている。つまり、本実験範囲では、応力比 R が0と-1 [図10(b), (c)] では、き裂先端の鈍化後に一端き裂伝ばが加速するもの、き裂伝ばは最終的に遅延している。しかしながら、 R が-1.5の場合 [図10(e)] には過大荷重負荷後にき裂伝ば速度は全体的にそれ以前の値より高い値を示し、余寿命が短くなっている。これらのことから、き裂先端の塑性変形、き裂開口挙動、き裂先端の残留応力分布およびき裂伝ば則は密接に関係していると考えられる。本実験の $R = -1.5$ の場合において、実験時に加えた応力の最大値は、過大応力負荷時の $\sigma_{OL} = 178 \text{ MPa}$ である。素材の下降伏点は $\sigma_{sl} = 283 \text{ MPa}$ であることから、それらの比 σ_{OL}/σ_{sl} は0.63である。また、リガメントでの正味応力を定義すると、 σ_{OL} は254 MPaとなり、その値と下降伏点 σ_{sl} との比は0.9となる。き裂は静的に大規模降伏し、その先端では図11(e)に示すように激しく鈍化した状態となっている。したがって、試験片が大きく、き裂先端での鈍化が小さい場合では、過大荷重負荷後のき裂伝ば挙動が本実験結果と異なる可能性があることは注意すべきである。このような

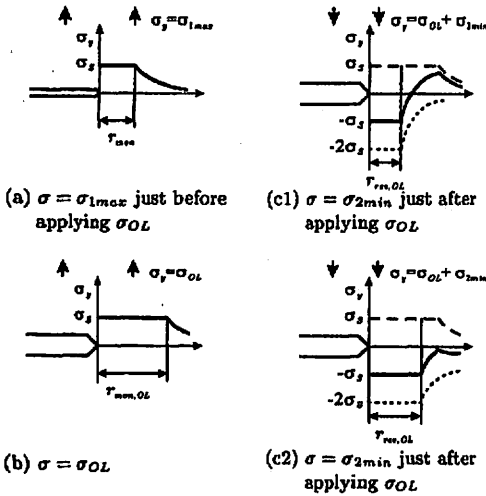


Fig. 11 Schematic illustration of a stress distribution and a plastic zone near crack tip when crack tip was blunted by overload

題もあるが、過大荷重による塑性域の形成とき裂伝ばの関係に関連づけるため、次のような検討を行ってみる。

真壁ら⁽¹¹⁾は、き裂伝ばの遅延・加速現象とき裂先端での残留応力分布について定性的に検討している。図 11 にその報告⁽¹¹⁾と Rice⁽¹⁴⁾のモデルに基づいて検討したき裂先端での応力分布と塑性域の模式図を示す。ただし、この場合は過大応力 σ_{OL} によってき裂先端が鈍化する場合について示している。図 11(a) は一定応力振幅下での最大荷重の時の場合であり、 r_{mon} はそのときに生じる塑性域である。(b) は過大荷重を負荷した時点であり、 $r_{mon,OL}$ はその際の塑性域である。(c1) および (c2) は過大荷重負荷直後の最小荷重点であり、 $r_{rev,OL}$ はその際の繰返し塑性域である。また、(c1) は $R = 0$ 、(c2) は $R = -1.5$ を想定している。そして、太い実線は着目する時点の応力分布、破線はその前の応力分布、点線は重ね合わせる応力分布である。過大荷重を負荷し、除荷することで、き裂先端には圧縮の残留応力が生じるが、荷重の最小の値が異なるので、繰返し塑性域の寸法が異なり、それがき裂伝ばの加速期間に影響を及ぼすと考えられる。真壁ら⁽¹¹⁾は、過大荷重負荷によってき裂先端が鈍化した場合には、荷重サイクルの条件によって、その後のき裂伝ば速度が加速する場合があることを示し、その現象をき裂先端における残留応力分布との関係に着目して考察している。そのことを、さらに詳細に述べると、過大荷重を負荷した時点の静的塑性域の大きさは、当

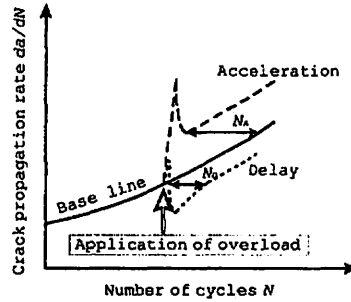
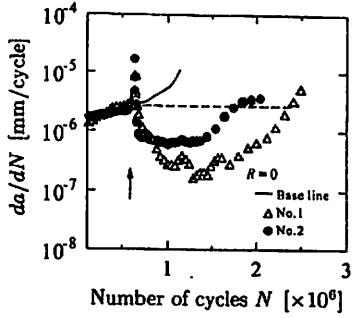


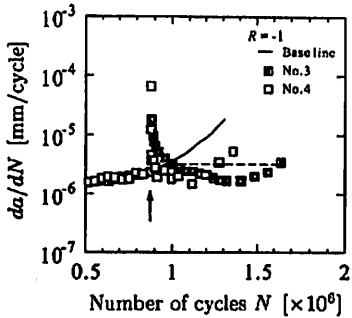
Fig. 12 Schematic illustration of a relation between da/dN and N

然応力比 R に関係せず、その大きさが過大荷重がき裂伝ばに及ぼす影響域の大きさ Δa を決定する。つまり、 Δa は R に依存しないが、図 11(c1)、(c2) に示すように、応力比 R によって過大荷重負荷直後の荷重過程におけるき裂先端に生じる圧縮の応力集中による逆降伏域 $r_{rev,OL}$ の大きさが異なる。真壁ら⁽¹¹⁾はその際の逆降伏によって残留応力が圧縮が引張りに反転すると述べているが、応力比によって、その過程は異なる。したがって、 $R = -1.5$ の場合と $R = 0$ の場合は同じ Δa の領域をき裂が通過する速度が異なってくる。それが、過大荷重負荷後の残留寿命に大きく影響する。

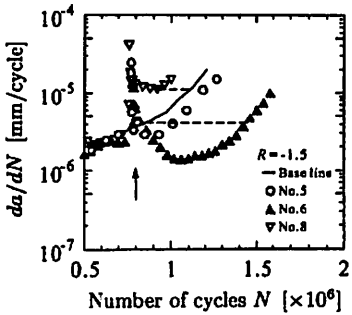
3.3 過大荷重負荷後のき裂伝ば余寿命について
過大荷重負荷によるき裂伝ばの遅延期間の評価するにあたって、Ward-Close ら⁽¹⁾は、き裂伝ば曲線、すなわち、き裂長さとき裂伝ば繰返し数の関係を用いて検討している⁽¹⁾。しかしながら、き裂伝ば曲線からき裂伝ばが加速する期間を求めるのは困難である。そこで、き裂伝ば速度 da/dN と繰返し数 N の関係からき裂伝ばの加速、遅延期間を決定した。図 12 に模式図を示す。矢印は過大荷重を負荷した点、 N_D は遅延期間、 N_A は加速期間である。すなわち、 N_D は、過大荷重を負荷した後に減速したき裂伝ば速度が過大荷重負荷前の時点の速度まで復帰するまでに要する応力繰返し数である。また、過大応力 σ_{OL} を負荷した後にき裂伝ばが加速する場合は、余寿命が短くなる。加速した伝ば速度が基本的な応力サイクル下での伝ば速度まで減速するとき裂伝ばは極小値に達し、その後の関係は σ_{OL} を負荷した場合の基本的な $da/dN-N$ 関係と平行な線図で表せる。そこで、この場合は、過大荷重を負荷した後、き裂伝ば速度の極小値の時点の応力繰返し数を、同じき裂伝ば速度の時点の σ_{OL} 負荷しない場合 (Base line) の応力繰返し数から差し引いた繰返し数を N_A と定義した。したがって、 N_A は負の



(a) $R_1 = R_2 = 0$



(b) $R_1 = R_2 = -1$

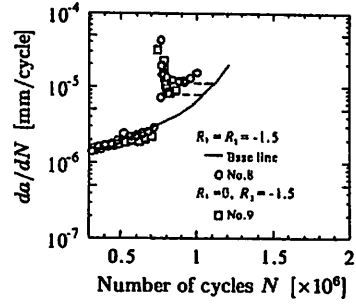


(c) $R_1 = R_2 = -1.5$

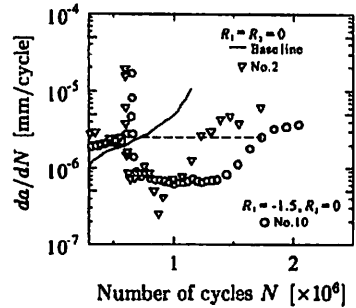
Fig. 13 Relation between da/dN and N where $R_1 = R_2$

値となる。

図 13 に過大荷重負荷前後で R が同じ場合の $da/dN-N$ の関係, 図 14 に過大荷重負荷前後で R の値が異なる場合をそれぞれ示す。基準となる基本荷重サイクルとしては, 過大荷重負荷後の応力比 R_2 の場合とした。前述したように, 過大荷重負荷後の余寿命は過大荷重後の負荷条件に左右される。そして, R_2 が 0 と -1 の場合には, $da/dN-N$ 線図によって, N_D が求められ



(a) $R_1 = 0, R_2 = -1.5$



(b) $R_1 = -1.5, R_2 = 0$

Fig. 14 Relation between da/dN and N where $R_1 \neq R_2$

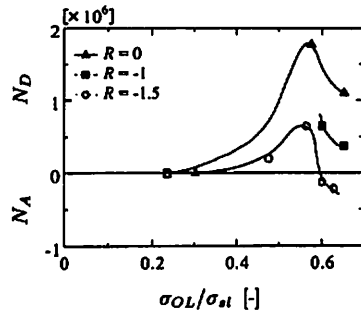


Fig. 15 Relation between σ_{OL}/σ_{st} and N_D

る。また, R_2 が -1.5 の場合には, σ_{OL} の値によって, 余寿命は N_D として評価される場合と N_A として評価される場合があることがわかる。なお, 図中の水平線は N_D や N_A を求めるための基準となる da/dN の値のレベルを示している。

図 15 に図 13 より求めた N_D, N_A を σ_{OL}/σ_{st} で整理した結果を示す。十分な実験データが得られた後に, 図 15 で得られるような結果を数値シミュレーションにより検討する予定であるが, 過大荷重によるき裂伝

ばの加速, 遅延には基本的な応力サイクルの応力比と過大荷重の大きさが大きく影響することがわかる. 図中の曲線は, 得られた範囲で実験点を結んでみたものである. 単一過大応力 σ_{OL} を大きくしていくと, き裂伝ばの遅延期間 N_D は長くなるが, σ_{OL} がある限界値を越えると N_D は減少していく. そして, N_D のピーク値は, 応力比 R によって異なる. 特に, $R = -1.5$ の基本負荷サイクルの条件下では, 過大荷重のレベルが低い場合は, 過大荷重負荷後のき裂伝ば余寿命が基本負荷サイクル下での余寿命 (き裂半長 $a = 3\text{mm}$ から破断時までの繰返し数) よりも長くなっているが, 過大荷重がある限界値より大きくなると余寿命が短くなり, 余寿命の短命化が生じている.

以上の結果より, 安定的に伝ばしているき裂に単一過大荷重を負荷した場合, 過大荷重の大きさと基本負荷サイクルの条件によって, き裂伝ば寿命が短くなることがわかった. このことは, 機械構造物の安全性, 信頼性を確保する上で, 注意を要すべき事柄であると考えられる.

4. 結 論

S15C を用いて単一過大荷重を受けた後の疲労き裂伝ばと余寿命における応力比の影響について検討した. 得られた主な結論は以下のとおりである.

1. 過大荷重負荷前で基本的な応力サイクルが同じなら, 応力比 R が 0 と -1 の場合, き裂伝ばは遅延した. しかしながら, 応力比が -1.5 においてき裂伝ばの遅延, 加速現象が観察された.
2. 過大荷重によるき裂先端の鈍化がほとんど生じない場合, き裂伝ばは遅延する. しかしながら, き裂先端が鈍化する場合は, その後の負荷応力条件によって, き裂伝ばは加速したり, 遅延したりする.
3. き裂伝ばの遅延または加速する過大荷重の影響

域は, 過大荷重負荷により生じる静的塑性域で決まる. また, その領域内でのき裂伝ば挙動は過大荷重負荷後の基本負荷サイクルの条件によって決まる.

4. $da/dN-N$ 線図を用いると, き裂伝ばの遅延期間 N_D と加速期間 N_A が容易に算出できる. そして, $R = -1.5$ では, 過大荷重がある限界値以上に大きくなると, 基本負荷サイクルの条件によってき裂伝ば寿命が短くなることがわかった.

最後に本研究に対してご助言を賜った University of Connecticut の A. J. McEvily 教授に感謝申し上げる.

文 献

- (1) C. M. Ward-Close, A. F. Blom and R. O. Ritchie, Engng. Fract. Mech., 32, 613-638(1989).
- (2) A. J. McEvily and Z. Yang, Metall. Trans. A, 21, 2717-2727(1990).
- (3) 松岡三郎・田中統一・神津文夫, 機論, 46-402, A(1980), 134-141.
- (4) 梶尾恵郎・安藤善司・森川邦彦, 材料, 29-323, 808-814(1980).
- (5) 松岡三郎・田中統一・神津文夫, 機論, 45-398, A(1979), 1135-1143.
- (6) 城野政弘・金谷哲郎・菅田淳・菊川真, 材料, 32-363, 1383-1389(1983).
- (7) G. J. Petrak, Engng. Fract. Mech. 6, 725-733(1974).
- (8) 真壁朝敏・崎浜寿, 機論, 59-564, A(1993), 1800-1805.
- (9) C. Makabe, A. J. McEvily, A. Purnowidodo, A. Yamauchi, Int. J. Modern Phys. B, 1580-1586(2003).
- (10) 真壁朝敏・A. Purnowidodo・山内章広・A. J. McEvily, 圧力技術, 41, 4(2003).
- (11) 真壁朝敏・A. Purnowidodo・A. J. McEvily, 材料, 53-5, 481-486(2004).
- (12) W. Elber, ASTM STP 486, 230-242(1971).
- (13) 菊川真・城野政弘・田中統一・高谷勝, 材料, 25-276, 899-903(1976).
- (14) J. R. Rice, ASTM STP 415, 237-311(1967).