

疲労き裂伝ば過程における過大荷重負荷履歴の検知手法*

真壁 朝敏^{*1}, 末吉 敏恭^{*1}
Anindito PURNOWIDODO^{*2}, 宇都宮 登雄^{*3}

A Detection Method of Overloading History during Fatigue Crack Propagation Stage

Chobin MAKABE^{*4}, Toshiyasu SUEYOSHI,
Anindito PURNOWIDODO and Takao UTSUNOMIYA^{**}Department of Mechanical Systems Engineering, University of the Ryukyus,
1 Nishihara-cho, Nakagami-gun, Okinawa, 903-0213 Japan

In the present study a detection method of an overload application during stress cycles under constant amplitude was investigated. Also, the effect of a tensile overload was shown at three stress ratios: $R=0, -1$ and -1.5 , in order to understand the effects of R on crack propagation after an overload. At a baseline of $R=0$, after an overload retardation in the crack propagation was observed. However, in the case of $R=-1.5$, the fatigue crack growth rate actually accelerated after a tensile overload. That behavior of crack propagation was tried to be detected by the information of strain waveform h ; $h = \epsilon_y + 1.2\lambda\epsilon_x$, where, ϵ_y and ϵ_x are the local strains at the specimen axis, and λ is the strain range ratio $\Delta\epsilon_y/\Delta\epsilon_x$. The waveform shape of h was changed after the overloading. Also, the application of an overload can be detected by the variation of the strain range ratio λ . Specially, the present method is useful for cases of the crack propagation stage under negative R conditions.

Key Words: Fatigue, Crack Propagation, Overload, Stress Ratio, Detection, Strain Waveform

1. 緒 言

機械要素の破壊の多くは欠陥や切欠部等の応力集中部から発生した疲労き裂に起因している⁽¹⁾。したがって、機械の定期点検に加えて切欠部等の弱い部分の日常的な検査を行えば、疲労破壊事故は減少するものと考えられる。そのような観点からの種々の疲労き裂発生検知手法が提案されている⁽²⁾。しかしながら、き裂を持つ部材が、どのような荷重履歴を受けてきたかを検知する手法について検討した研究は少ないと思われる。疲労き裂が定常状態で伝ばするのであれば、点検時のき裂長さから寿命の予測ができる。しかし、荷重変動が生じた場合にはその予測精度が十分でないことがあり得る。そのような問題の1つに過大荷重負荷後のき裂伝ばの問題がある。本研究では、一定応力振幅の疲労き裂伝ばの途中で単一過大荷重が加わった場合、その荷重履歴を検知する手法について検討した。Makabeら⁽³⁾は、過大荷重を負荷した後に、一定応力振幅下(負の応力比の場合)のき裂伝ばが、

遅延するのではなく、加速する場合があることを示した。本研究では、特に、このようなき裂伝ばの加速が生じた場合に、過大な荷重が負荷されたことが検知できるかどうかについて検討した。

2. 素材および実験方法

用いた材料は炭素鋼 S35C である。素材を 870°C で 1 時間焼きなました後、試験片を作製した。素材の化学成分と機械的性質をそれぞれ表 1 と表 2 に示す。試験片形状は図 1 に示すような平板部分を有する形状のものである。また、中央き裂の伝ば挙動について検討するため、平板部中央部に長さ約 2.5 mm、先端半径 0.1 mm の切欠き(スリット)を加工し、その端部から長さ約 0.25 mm の予き裂を発生させた。そして、き裂は中央き裂として扱い、切欠長さを含めてき裂長さ $2a$ を定義した。予き裂導入後 750°C、1 時間の真空焼なましを行った。疲労き裂伝ば試験は引張圧縮方式で電気油圧サーボ式疲労試験機を用いて、繰返し周波数 10 Hz で行った。ただし、過大荷重は一定応力振幅 σ_a のき裂伝ば試験を中断し手動により加えた。応力振幅 σ_a 、繰返し最大応力 σ_{max} 、そして一回の過大応力 σ_{ov} の組合せは表 3 のとおりである。また、表 3 の記号 R は応力比 $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ (σ_{min} は繰返し最小応力)、 Q は無次元過大応力レベル σ_{ov}/σ_{max} である。過大応力 σ_{ov} は、

* 原稿受付 2002 年 6 月 26 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} 琉球大学大学院理工学研究科。^{*3} 正員、芝浦工業大学工学部(〒108-8548 東京都港区芝浦 3-9-14)。

E-mail: makabe@tec.u-ryukyuu.ac.jp

Table 1 Chemical composition (mass %).

C	Si	Mn	P	S	Ni	Fe
0.37	0.17	0.70	0.019	0.016	0.04	Bal

 Table 2 Mechanical properties (σ_s , σ_B , σ_T and ϕ are lower yield point, tensile strength, true fracture stress and reduction of area, respectively).

σ_s , MPa	σ_B , MPa	σ_T , MPa	ϕ , %
292	493	975	62

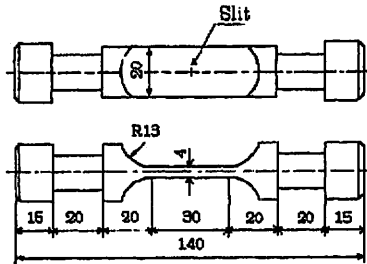


Fig. 1 Shape of the specimen (mm).

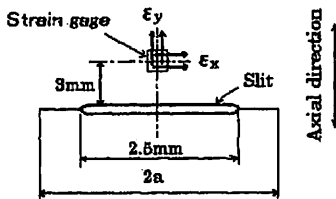


Fig. 2 Pasting method of strain gage.

き裂半長 a が約 3 mm の時点で負荷した。なお、特に断らない限り、本報告では過大荷重は単一の引張りの過大荷重を意味する。き裂長さは金属顕微鏡とダイヤルゲージを組み合わせて、試験片表面において測定した。そして、過大荷重による局部ひずみの変動を調べ、過大荷重履歴の検知を行うために、2軸形ひずみゲージを試験片に貼り付けた。図2にその位置を示す。

真壁ら⁽⁴⁾⁽⁵⁾、宇都宮ら⁽⁶⁾はひずみ波形を用いて、切欠きから発生するき裂を検知する手法を検討した。本研究においてもそれらと同様な手法によって、

Table 3 Testing conditions.

Specimen Number	σ_a MPa	σ_{max} MPa	σ_{ov} MPa	R	Q
1	43	86	172	0	2.0
2	67	67	180	-1.0	2.7
3	85	67	184	-1.5	2.7

疲労き裂伝ばの途中でき裂部位に過大な負荷が作用したかどうかを検知する方法について検討した。次式はその際に用いたひずみ関数である。

$$h = \varepsilon_y + 1.2 \lambda \varepsilon_x \quad (1)$$

$$\lambda = \Delta \varepsilon_y / \Delta \varepsilon_x \quad (2)$$

ここで ε_y , ε_x は図2に示した2軸形ひずみゲージから出力される軸方向およびそれと垂直方向のひずみであり、 $\Delta \varepsilon_y$, $\Delta \varepsilon_x$ は1サイクル間のそれぞれの変化幅である。特に本研究では、実験において繰返す外力が測定できない場合でも、発生したき裂の近くのひずみを検出することによって、過大荷重が負荷された履歴があるかどうかを調べる手法について検討することを試みた。現段階では定性的であるが、式(1), (2)に示すような単純な式で簡単にそれが検知できれば、有意義なことであると考えている。なお、式(1)の右辺の定数 1.2 は経験的な値であり、物理的に意味のあるものではないが、本実験のような中央き裂試験片では、この程度の値が好ましい。また、き裂開口点応力の測定方法として最も信頼性のある除荷弾性コンプライアンス法⁽⁷⁾のパラメータである引算変位を使っても同様な手法で検知できると思われるが、本研究では式(1), (2)を用いて検討した。

3. 実験結果および考察

3・1 単一過大荷重負荷後の疲労き裂伝ば挙動について 図3に表3の実験条件下でのき裂伝ば曲線を示す。過大荷重を負荷しない場合の一定応力振幅の疲労試験では、き裂伝ば曲線は単調増加する滑らかな曲線である。しかしながら、図3に示すように過大荷重を負荷すると、き裂伝ば曲線は折れ曲がった複雑な曲線となる〔詳細は文献(3)に示したので、ここでは簡単に記述する〕。図3は応力比 R が 0, -1 そして -1.5 の場合について示してあり、各応力比の場合で異なったき裂伝ば曲線が得られた。一定応力振幅のき裂伝ばの途中でき裂半長 a が約 3 mm の時点で過大荷重を加えたが、その位置は図中に R の値を付した矢印で示してある。図4は図3を基にして作成したき裂半長

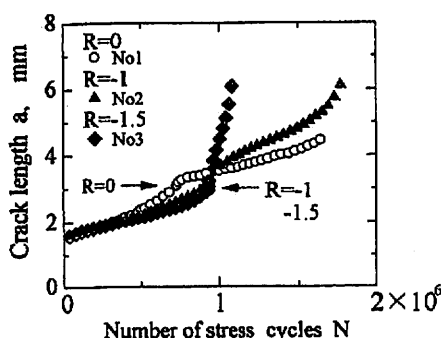
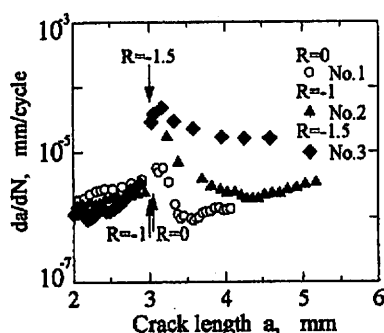


Fig. 3 Crack propagation curves of the overloading tests.

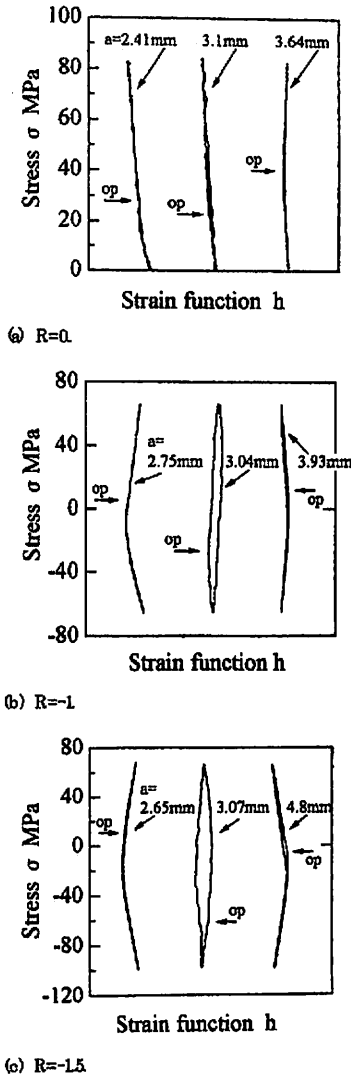
Fig. 4 Variations of the crack propagation rate da/dN .

a とき裂伝ば速度 da/dN の関係である。応力比 R が 0 の場合には、過大荷重負荷後にき裂伝ば速度が低下し遅延現象が生じることがわかる。 R が -1 の場合には、過大荷重負荷直後に一旦、き裂伝ばが加速した後に遅延が生じるので、遅延の程度は R が 0 の場合よりも小さい。それらに対して、 R が -1.5 の場合には、過大荷重負荷後は全般的にき裂伝ば速度が速くなり、き裂伝ば寿命が短くなっている。このことは現在、詳細に継続して検討しており、他の実験条件でもほぼ同様な結果が得られる場合がある。当然、単一過大荷重負荷は推奨されていないが、従来の観点⁽⁸⁾からは、それによってき裂伝ばが遅延するとみなされるので安全であるとも受取れる。しかし、本研究で示した結果では過大荷重の負荷は逆に危険側に作用する場合があるので、このような条件について明らかにしていく必要があると思われる。本研究は過大荷重が負

荷されたかどうか、簡単に検知できるかどうかを検討することが目的であるが、図 3, 4 の結果から、このような検知手法を検討することは意味のあることであると考えた。

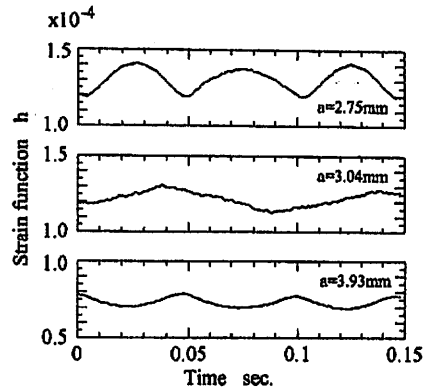
3・2 過大荷重負荷履歴の局所ひずみによる検知について ひずみ波形の変化によって切欠部からのき裂発生が検知できることを先の研究^{(4) - (6)}では示した。本研究においては、それらの研究と同様な手法によりひずみ情報によってき裂を持つ部材に過大荷重が加わったことを検知する一つの手法を示す。過大荷重が加わった場合には、前節に示したように、き裂伝ば挙動に変化が生じる。その場合、き裂伝ばが遅延すれば、安全側にその効果が作用する。しかしながら、遅延が生じない場合には、過大荷重は危険である。もし過大荷重が加わったことがアラーム等で確認できれば、その対策が立てられる可能性が高くなる。単一の過大荷重が負荷サイクルの途中で加わった場合、その時点の応力波形やひずみ波形が検出されれば、その荷重履歴が確実に認識できる。しかしながら、その荷重は唯一なものであるので、その時点の波形測定がなされない場合もあり得る。本実験手法では、このような過大荷重負荷をその時点で確実に認識しなくても、ひずみ関数の波形の変化やひずみ幅の比の変化から、それを検知できる可能性があることを示す。もし、危険な荷重の履歴が認識できたなら、その時点で定期点検計画を見直すことができる。そして、このようなことを検討しておくことは、機器の破壊事故を未然に防ぐ手法の検討を進める上で必要なことであると考えている。

図 5 は繰返し応力 σ と式 (1) で示したひずみ関数 h の関係である。図 5(a), (b) そして (c) はそれぞれ $R=0$, -1 そして -1.5 の場合である。なお、横軸の h の値自体には物理的には明確な意味がなく、 $\sigma-h$ ループの形状を本研究では重要視したので、その値は横軸に記していない（ただし、それらの尺度は同じである）。また、いずれの図の場合も $\sigma-h$ ループは、過大荷重負荷以前、および直後（具体的には図 5(a), (b) そして (c) の場合において、それぞれ過大荷重負荷後 4×10^3 , 1×10^3 として 1×10^3 サイクル目）、そしてその後にき裂が十分成長した段階の順番で示してある。これらの図から過大荷重負荷後では $\sigma-h$ ループが横に膨らむので、過大荷重を負荷したという情報がひずみに含まれることがわかる。そして、その後 $\sigma-h$ ループの形状は次第にも変わって行く。ただし、 $R=0$ の場合は他の場合に比べて、それ程ループの形が変化しないの


 Fig.5 Variations of the $\sigma-h$ loop by overloading.

で、過大荷重負荷の有無の判定が難しいが、その場合、き裂伝ばが遅延するので問題は無い（安全側である）。なお、 $\sigma-h$ ループが横に膨らんだ応力サイクルの期間は、 R が-1と-1.5の場合ともに過大荷重を負荷してから約 1×10^6 サイクルの間である（それぞれの場合の破断繰返し数は、 1.8×10^6 と 1.1×10^6 であった）。

R が-1以下の場合にはき裂伝ば速度が過大荷重によって平均的に高くなる場合があるので、特に、注意する必要がある。その場合には、図5のようなループ形状


 Fig.6 Variation of the strain waveform in the case of $R=-1$.

によっても、過大荷重負荷の有無の判定ができると思われる。しかしながら、連続的にデータを検査、解析するには時間を追って追跡できる波形の方が有利である。また、外力信号である荷重波形が未知な場合もあるので、ひずみ波形のみからの判断手法も検討する必要がある。なお、図5中には、記号 op を付した矢印で参考までにき裂開口点の位置を示した。き裂開口点は $\sigma-h$ ループの荷重時点の折曲がり点で判定できる。また、図5(b),(c)において、 $\sigma-h$ ループの形状が左に凸であったものが右に凸へと変化しているが、それは $\sigma-\epsilon$ ループの勾配の符号がき裂進展過程の途中で変化したためである。このような変化は、過大荷重負荷の如くに拘らず生じ、変化点のき裂長さはいずれもゲージの位置と荷重条件によって異なる。

図6にひずみ関数 h の波形の例として応力比 R が-1の場合を示す。加えた応力波形は正弦波であるが、き裂の開閉口やき裂先端付近での塑性域の形成等のためにひずみ関数 h の波形は単純な正弦波とはなっていない。次に、式(3)に示す関数を用いて、ひずみ関数の波形と応力波形を比較検討してみた。

$$H = (h - (h_{\max} - g \Delta h)) / (g \Delta h) \quad (3)$$

ここで、 $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$ 、 $g = 1/(1-R)$ であり、 h_{\max} 、 h_{\min} 、 R はそれぞれ、式(1)の関数 h の数サイクル間の最大値と最小値そして応力比である。応力とひずみの値はオーダが異なる。そこで、ここでは、一般的な手法ではないが、ひずみ関数 h と応力の波形を同時に示し、比較検討を容易にするために式(3)で示す関数 H を定義した。つまり、関数 H は無次元応力（最大値での無次元化）の波形とその波形の最大値と最小値が揃い、

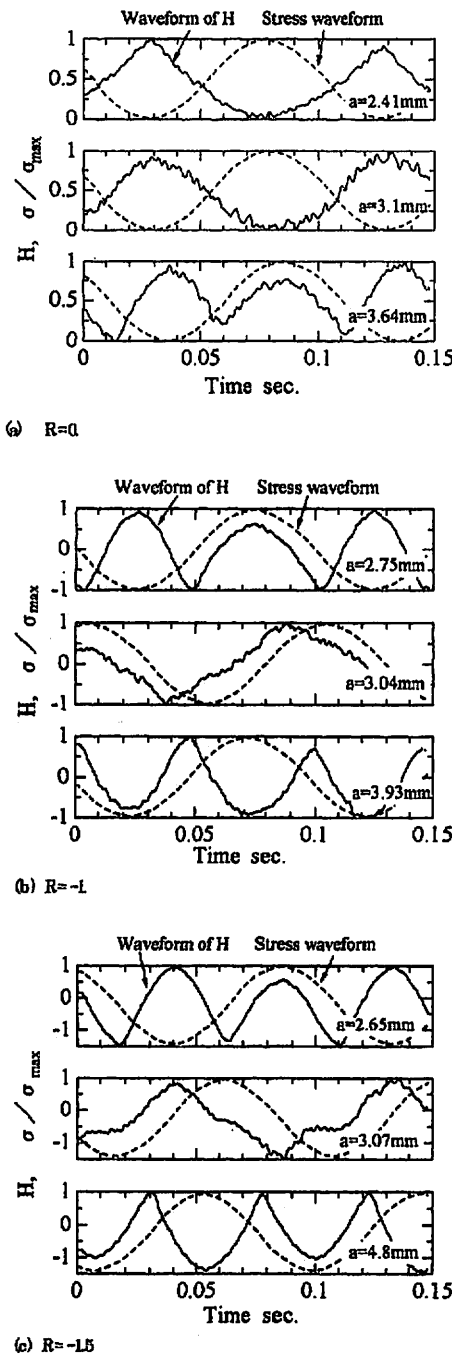
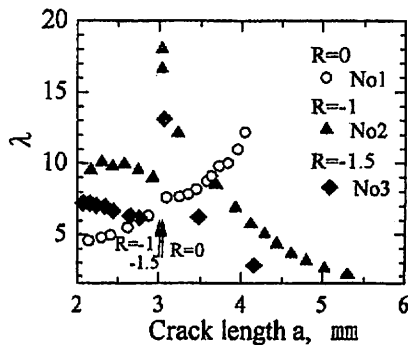


Fig.7 Detection of the overload application by strain waveform

同じ図に同時にプロットできるようにするための関数である。図7に無次元化応力の波形と関数Hの波形を示す。図7(a), (b)そして(c)は、それぞれ、 R が0, -1そして-1.5の場合である。図5と同様にいずれの図の場合も波形は、過大荷重負荷以前、ほぼ直後、そしてその後にき裂が十分成長した段階の順番で示してある。また、実線はひずみ関数Hの波形、破線は応力波形である。ひずみ関数Hの波形の観察結果から、特に R が負の場合には明らかに過大荷重負荷前後で波形に変化が生じていることがわかる。この変化は、き裂が伝ばする際にき裂先端が開閉口し、局所ひずみが変わることに基づくものである。本実験の負荷条件においては、過大荷重負荷以前には、き裂は小規模降伏条件を満たして伝ばし、き裂先端の繰返し塑性域はき裂長さに対して十分に小さいものである。しかしながら、過大荷重負荷時にはき裂先端にき裂長さに対して無視できない程度の静的な塑性域が形成される。この静的な塑性変形域の影響が過大荷重負荷後のひずみ関数 h に現れる。そして、き裂が十分に成長し、過大荷重による静的な塑性変形域を通り抜けると、再び小規模降伏条件下でのき裂伝ば挙動を示す。そのようなことが根拠となって図6, 7で示されるひずみ波形の変化が生じている。

極値の位置をHの波形と応力波形で比較すると、過大荷重負荷以前と過大荷重負荷後に十分にき裂が成長した段階では、応力波形の極値とはほぼ同じ位置にHの波形の極値も存在する（ただし、極大値と極小値の区別はしない）。しかしながら、特に R が負の場合、過大荷重負荷後にき裂先端が静的な塑性変形域を脱出しない間では、応力-ひずみ関係の非線形なふるまいによって、応力波形とHの波形の極値の位置は一致していない。そのような変化を捕らえるためには、ひずみ波形の連続的な測定あるいはある一定間隔での定期測定が必要である。明瞭な波形変化が生じた期間は $\sigma-h$ ループが膨らんだ期間とほぼ一致し、それが約 1×10^5 サイクルであることを考慮すると、本実験条件のような場合は、定期的な測定を 5×10^4 サイクルより短い間隔で行う必要があると考えられる。

図8は式(2)に示すひずみ幅比 $\lambda (= \Delta \epsilon_s / \Delta \epsilon_x)$ のき裂半長 a に対する変化を示したものである。過大荷重を加えた位置は図中に矢印で示しており、過大荷重負荷前後で $a-\lambda$ 線図の勾配に変化が生じていることがわかる。 $R=0$ で過大荷重の後に $a-\lambda$ 線図の勾配の符号に変化はないものの、何らかの変化が生じたことは線図を見てわかる。 R が負の場合においては、

Fig. 8 Variation of the strain range ratio λ during the crack growth

より顕著な変化が見られる。これらの場合、過大荷重負荷後、 λ が一旦増加し極大値に達した後次第に減少していく。その傾向からも過大荷重負荷の有無が確認できるので、その後のき裂伝ばに対する注意がうながせる。図 6-7 を図 8 と関連させて考えると、過大荷重の負荷によってき裂先端に形成された塑性変形域の影響が λ の変化にも影響することが考えられる。本実験範囲では R が正の場合と負の場合で $a-\lambda$ 線図に異なる傾向があるがその原因については現在のところ不明である。局所ひずみの負荷条件や測定位置による変化を数値解析等により検討することによって、その理由は明らかになるものと考えられる。

本報告では、き裂伝ばに有害となり得る荷重履歴の検出法の一つとして、局所ひずみを用いる方法があることを紹介した。ただし、検討事例としては単一の引張りの過大荷重が負荷された場合の 3 例のみであり、その有効性が十分に示されたわけではない。今後、種々の過大荷重負荷条件で実験を行い、ひずみ波形の変動と過大荷重負荷後のき裂長さとの関係を明らかにする必要があると考えている。真壁ら⁽⁵⁾は、モード I のき裂が小規模降伏条件で安定的な成長をする場合、その中心軸上のひずみからき裂長さを推定できることを示した。しかし、き裂先端付近に非線形的な挙動をもたらす過大荷重が負荷された場合や測定ひずみがき裂中心軸上のひずみでない場合等には、その手法⁽⁵⁾が適用できない。そのような問題に対しては、有限要素解析等を用いて検討する予定である。なお、本研究では検討しなかったが、疲労き裂伝ばを加速させるような圧縮の過大荷重が含まれる条件下において、荷重履歴が検知できるかどうかを検討することは、特に重要であると思われる。

4. 結 言

き裂中央軸上の局所ひずみを用いてき裂を有する部材に異常な荷重が負荷されたかどうかの履歴を検知する手法の一つを検討した。本研究では一定応力振幅疲労き裂伝ば試験において過大荷重負荷があったことが局所ひずみによって検知できる可能性があることを定性的に示した。また、本研究では、特に応力比 R が負の場合に注目した。得られた結果は以下のとおりである。

(1) 応力比 R が 0 の場合は単一過大荷重負荷によって、疲労き裂伝ばが遅延するので大きな問題は無いが、 R が負の場合、過大荷重負荷によってき裂伝ば寿命が短くなるという危険な場合がある。繰返し応力 σ とひずみ関数 h の関係を検討した結果、 $R=0$ の場合は過大荷重負荷後もループの形があまり変化しないことがわかった。応力比 R が -1, -1.5 の場合、過大荷重負荷後に $\sigma-h$ ループが膨らんだ。このようなことに基づき、特に過大荷重が危険側に作用する場合である、 R が負の場合には、 $\sigma-h$ ループの形状変化が過大荷重負荷等の警戒信号になり得ることが分かった。

(2) 波形は、時間の変化に応じて連続的に監視することができることから、ひずみ関数の波形を調べることによって、過大荷重履歴が検知できるかどうか検討した。その結果、特に応力比 R が負の場合、過大荷重を負荷したほぼ直後のひずみ関数の波形はそれ以前の波形とは異なる特性を示すことがわかった。その波形を観察することによって、過大荷重履歴が検知できることが期待される。

(3) き裂中央軸の縦方向と横方向のひずみ変動幅の比 λ をき裂半長 a に対して追跡した。その結果、過大荷重負荷時点を境として、 $a-\lambda$ 関係に明瞭な変化が現れた。したがって、特に直接、過大荷重が加わったという信号を得ることができなくても、 $a-\lambda$ 関係の変化を検出することによって過大荷重が負荷されたという可能性が察知できる。

(4) 局所ひずみによって、過大荷重履歴の検知ができるのは、過大荷重によって部材が非線形的な変形挙動を示すことに基づいている。

最後に、本研究に関しご助言をいただいた Connecticut 大学の A.J. McEvily 教授ならびに本研究の対し助成を賜った高橋産業経済研究財団に感謝申し上げます。また、本研究を行うにあたり、実験の一部を手伝っていただいた当時、琉球大学大学院生、山内章広氏に感謝申し上げます。

文 献

- (1) 西田, 機械機器破損の原因と対策, (1986), 5, 日刊工業新聞社
 - (2) A. J. McEvily, Metal Failures, (2001), 181, John Wiley & Sons, INC.
 - (3) C. Makabe, A. J. McEvily, A. Purnowidodo and A. Yamauchi, Int. J. Modern Physic B. 投稿中
 - (4) 真壁・西田・兼松・玉城, 機論, 58-551, A (1992), 1191.
 - (5) 真壁・糸数・大場・兼城, 機論, 58-546, A (1992), 186.
 - (6) 宇都宮・石井・真壁・飯田, 機論, 66-646, A (2000), 915.
 - (7) 菊川・城野・田中・高谷, 材料, 25-276, (1976), 899.
 - (8) H. Bao and A. J. McEvily, Met and Mat. Trans. A, 26A, (1995), 1725.
-