過大荷重後の疲労き裂伝ばの遅延 挙動の体積力法による解析*

陳 玳 珩**, 西 谷 弘 信***

Analysis of the Delaying Effects of Overloads on Fatigue Crack Propagation by the Body Force Method

by Dai-heng CHEN and Hironobu NISITANI

By using the extended body force method, a simulation analysis of fatigue crack propagation was carried out to investigate the delaying effects of overloads on fatigue crack propagation. It is shown that the transitional behavior of fatigue crack propagation after overloads can be demonstrated by the analytical results of the plasticity induced crack closure. The crack closure behavior after overloads was explained simply by taking into account the changes in δ_{tip}^{max} and $\delta_{R,tip}$ during the transitional process, where δ_{tip}^{max} is the crack tip opening displacement at the fully loaded state and $\delta_{R,tip}$ is the total thickness of the stretched material remaining on the upper and lower surfaces at the crack tip. The retardation of crack propagation due to overloads was discussed quantitatively based on the results of the present calculation. For the single peak overloads the δ_{tip}^{max} just after the peak overload is proposed to correlate the number of delay cycles for various combinations of load levels.

Key Words: Fatigue, Retardation of Crack Propagation, Body Force Method, Overload, Simulation Analysis, Crack Closure

1. 結 言

一定振幅荷重に少数回の大荷重が加わる場合や、荷重振幅が高-低に切替わる場合のき裂伝ばの遅延現象について多くの研究が行われている。その過大荷重後の疲労き裂伝ばの遅延現象の生じる原因については、き裂先方の残留応力、き裂先端の鈍化、き裂開閉口現象などが考えられる。最近、過大荷重後のき裂開閉口点の実測に基づいて、このようなき裂伝ばの遅延現象をき裂の開閉口現象と関連させる検討が多く報告され⁽¹⁾、遅延現象の原因としてき裂開閉口現象が最も有効な因子であるとされている。

また解析的面から、小倉らは有限要素法による変動荷重下のき裂伝ばシミュレーション計算でき裂の開閉口挙動を解析的に求め、それとき裂伝ばの遅延現象との対応関係を調べた⁽²⁾。一方、著者らはこれまでに拡張した体積力法⁽³⁾を応用し、疲労き裂伝ばのシミュレーション解析を試み⁽⁴⁾⁽⁵⁾、それらの解析が疲労き裂の開閉口挙動を支配する種々の因子から力学的因子を区別して取扱うのに非常に有効であることを確認した。

そこで本研究では、同様の手法を用い過大荷重後のき裂開閉口挙動の解析を行い、その疲労き裂開閉口の力学要因を明らかにしたうえで、大小荷重の上・下限の種々の組合せについて過大荷重によるき裂伝ばの遅延効果を定量的に検討した。

2. 解 析 方 法

解析の対象は平面応力下の無限板におけるモード I 形の疲労き裂である。解析の力学モデルは D-B モデルである。材料は弾完全塑性体で、引張りと圧縮の降伏応力 σ_0 を等しいとする。

解析に用いた荷重形式は、図 1 に示すような、単一過大荷重が挿入される場合と荷重振幅が高-低に切替わる場合である。荷重の支配パラメータとしては、応力拡大係数 K を用いる。すでに報告したように⁽⁶⁾、Dugdale モデルを利用した塑性誘起き裂開閉の解析では、相似則が成り立つことになるので、き裂長さおよび応力拡大係数の値そのものは意味をもたない。したがって、ここでいう荷重が変動するときの応力拡大係数はき裂半長 a_0 を 1 とするときのもので、単なる相対的な意味しかもっていない。すなわち ΔK を一定とすることは、き裂長さの変化に応じて ΔK が一定となるように負荷応力を変化させることに対応してい

* 昭和 61 年 4 月 2 日 第 63 期通常総会講演会において講演。

原稿受付 昭和 60 年 10 月 7 日。

** 正員、九州大学大学院 (〒812 福岡市東区箱崎 6-10-1)。

*** 正員、九州大学工学部。

る。また小規模降伏に近い条件のもとでき裂伝ばのシミュレーション解析を行うため、塑性域寸法が常にき裂長さの1/10以下となるように荷重をえらんだ。

解析方法はこれまでの報告⁽⁵⁾⁽⁶⁾において用いたものと同じである。すなわち、き裂の伝ばに伴ってき裂前方の一つ一つの分割要素が次々とき裂面となり、それによって元来き裂前方の塑性域にあったこれら要素の塑性ストレッチが新しいき裂面に付着する残留ストレッチになるとして、き裂伝ばのシミュレーション（1回ごとのき裂伝ば量はき裂前方の一つ分割区間の長さである）を行った。ただし、荷重の変動は前段階のき裂伝ばが安定状態になった時期に行うので、計算時間を減縮するため（この安定状態はき裂伝ばのシミュレーション解析によってもえられるが、時間が多くかかる）、この安定状態を一定残留ストレッチ仮定モデル⁽⁶⁾によって求めた（このことは別の研究結果によって正当化されている）。

数値解析には、弾塑性問題に拡張した体積力法⁽³⁾を用いた。すなわち、それぞれの塑性域の降伏条件を含めた境界条件をみたとすように、き裂も塑性域も存在しない無限板中の、き裂および帯状塑性域となるべき仮想境界上に適当な密度の体積力対を分布させた。数値計算にあたっては、き裂部分と塑性域が広がると予想される部分を分割し、分布させる体積力対の密度を各分割区間での重みで離散化する。き裂先端近傍での一分割区間の長さは $K_{\max,h}$ のもとでの塑性域の約 1/250 とした。

なお、体積力対の密度は、Dugdale 形塑性域での塑性変位またはき裂面の開口変位に対応し、き裂面に付着する残留ストレッチはそこに残る残留体積力対に対応している。除荷の際に、き裂面の開口変位がそこに付着している残留ストレッチに等しくなったとき、こ

の要素が接触し始めるとする。き裂先端から後方のいずれかの要素が最初に接触し始めるときの K をき裂開口開始荷重 K_{cl} と定義する。また負荷時、き裂先端から後方の第1番めの要素が分離し始めるときの K をき裂開口開始荷重 K_{op} と定義する。

3. 解析結果および考察

3・1 単一過大荷重の場合 まず振幅一定の基準荷重の継続中に1回の単一変動荷重が挿入される場合の結果について述べる。

図2は、両振りの基準荷重の場合において単一変動荷重が挿入された後のき裂開口開始点 K_{cl} の変化様子を、き裂半長 a に対して示したものである（ K_{op} も同じ特徴を示すが、紙面の都合で省略する。以下、き裂開口レベルについてすべて K_{cl} で議論する）。まず、 $K_{\min,h}$ を固定して ($K_{\min,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0} = -0.25$, 以下 $K_{\max,h}$, $K_{\min}$ の添字 h, l はそれぞれ過大荷重, 基準荷重を表すものとする), $K_{\max,h}$ を変化させると、図2より分かるように、 $K_{\max,h} \leq K_{\max,l}$ なら、単一変動荷重が挿入されても、その後のき裂の開閉口挙動には変化がない。それに対して、 $K_{\max,h} > K_{\max,l}$ の場合、き裂開口レベルは過大荷重によっていったん大きく低下し、その後き裂の伝ばに伴って次第に上昇し、定常状態レベルより高い極大値に達してから下降しながら定常値に近づいていく。過大荷重の $K_{\max,h}$ が大きいほど、その過渡過程における開口レベルの極大値も大きい。図3(●, ○印)にもいくつかの過大荷重条件についてこのことを示す。なお、 $K_{\max,h}$ が大きいほど、その極大値に達するときのき裂長さも大きい。

図2にはまた単一変動荷重の $K_{\max,h}$ を固定して ($K_{\max,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0} = 0.25$), $K_{\min,h}$ の変化による影響を検討した結果も示してある。その結果では、 $K_{\min,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0} = 0.0625, 0$ および -0.125 の3種類の場合の過大荷重後のき裂伝ばにおける開口挙動には差異が

図1 用いた荷重形式

図2 過大荷重後のき裂開口開始荷重 K_{cl} の変化

ない。したがって、 $K_{min,h}$ が $K_{min,l}$ より大きければ、それを加えても、その後のき裂伝ば挙動に対して影響を及ぼさない。これに対して、 $K_{min,h}$ が $K_{min,l}$ より小さければ、その逆圧縮によって、開閉レベルはこれがない時と比較して若干下降する。図3 (▲, △印) もこのことを示している。なお、その影響は $K_{max,h}$ の変化によるそれより小さい。

以上のようなき裂開閉挙動は、一般に、き裂が先端近傍に形成された塑性域中を伝ばしていく結果、き裂縁に引張りの塑性変形層が残る。除荷の状態では、これがまわりの弾性域に拘束されてき裂縁に圧縮の残留応力を生じることによって起因するものと思われる⁽⁷⁾。図4は、その間の事情をさらに明確にするため、過大荷重が挿入された後のき裂伝ばに伴う、 $K_{max,l}$ のときのき裂先端の開口変位 δ_{tip}^{max} とき裂先端での残留ストレッチ $\delta_{R,tip}$ を示したものである。図4には、過大荷重挿入前後の最小負荷時のき裂前方での残留塑性ひずみも示してある。図4から分かるように、過大荷重によってき裂前方に大きい引張りの塑性変形層が残るので、過大荷重後のき裂の開口変位は基準荷重における定常

値より大きくなって、その結果過大荷重直後のき裂開閉レベルはいったん大きく低下する。しかし、その後のき裂伝ばによって、 $\delta_{R,tip}$ は急激に大きくなり、それによって除荷時にき裂面が閉じやすくなり、き裂の開閉レベルが上昇する。その $\delta_{R,tip}$ がほぼ最大値に達した時 (図4中のA点)、き裂の開閉レベルは定常値 (この例では $K_{cl}/K_{max,l}$ が約0.44) にまで上昇する。その後、 $\delta_{R,tip}$ は徐々に減少するが、 δ_{tip}^{max} も減少する。結局、その互いの変化程度 (すなわち、図4中に示した δ_{tip}^{max} と $\delta_{R,tip}$ 両曲線間の間隔の変化) によって、き裂の開閉レベルが依然として上昇し、図中のC点の所で極大値 (この例では約0.8) にまで上昇する。過大荷重による塑性域 (図4中のD点) をほぼぬけた時、 δ_{tip}^{max} も $\delta_{R,tip}$ もともに定常値に戻って、き裂の開閉レベルは定常値に回復する。したがって、過大荷重が挿入された後のき裂伝ばにおいては、 δ_{tip}^{max} が一度定常値より大きくなってから次第に定常値に減少していく過程と、 $\delta_{R,tip}$ が最初に上昇して、その後減少に移って定常値に近づく過程との相互総合の結果として、図2に示したような開閉挙動がえられることになる。

すでに明らかにしたように⁽⁵⁾、き裂が開いている間の荷重幅に基づく有効応力拡大係数幅 $\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{cl}$ はき裂先端の繰返し変位幅 $\Delta \delta_{tip} (= \delta_{tip}^{max} - \delta_{R,tip})$ とよく対応している。したがって、もしそのき裂先端の繰返し変位幅 $\Delta \delta_{tip}$ をき裂伝ば速度の尺度とみなせば、図2に示したように、過大荷重後のき裂開閉レベルが定常値より上まで上昇することは過大荷重によるき裂伝ばの遅延現象を意味することになる。本研究では、さらにき裂の伝ば速度を $da/dN = C_1 \Delta \delta_{tip}$ と仮定して、各一ステップのき裂伝ば量に対する荷重の繰返し数を計算する。それによって得られたき裂長さの繰返し数との関係を図5に示す。

図3 過渡過程における $K_{cl}/K_{max,l}$ の極大値

図4 過大荷重後のき裂伝ばに伴う δ_{tip}^{max} , $\delta_{R,tip}$ の変化および過大荷重前後のき裂前方にそう δ_x^{min} の分布

図5 き裂長さの繰返し数との関係

図5に示した遅延現象の全体的な特徴, すなわち, 両振りより片振りのほうが遅延効果が大きいこと, 遅延現象が過大荷重の直後ではなく, き裂が多少伝ばしてから起こることなど, は実験でえられたそれ⁽⁸⁾とほぼ同じである。したがって, 塑性誘起き裂開口の解析によって, 過大荷重後のき裂伝ば遅延現象を説明できると結論される。

過大荷重による遅延効果を定量的に表現するため, 一般に図5に示すような遅延期間 N_D , すなわち過大荷重が挿入された場合とそれがない場合とを比較して, 定常状態に回復するまでに余分の繰返し数 N_D を用いる。この遅延期間 N_D に影響する因子としては, 荷重レベル, 過大荷重比, 応力比, 材料強度など多くのものについて実験結果から調べられている⁽⁹⁾が, 本研究では, 塑性誘起き裂開口現象だけを考慮にいった

場合の, Dugdale モデルに基づく解析において, N_D が主に何によって支配されるかを検討する。

すでに図2, 3に示したように, 過大荷重後のき裂開閉口挙動は $K_{\max,h}$ と $K_{\min,h}$ の両者によって影響される。また図4から分かるように, 過大荷重がき裂開閉口挙動に及ぼす影響は, その $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}$ と $\delta_{R,\text{tip}}$ の変化を通じて現れるものである。そして, $\delta_{R,\text{tip}}$ が定常値からずれる理由が, $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}$ の値の変化に起因しておりまたそれがき裂前方の残留塑性歪によると考えれば, 過大応力の効果は, 主に $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}$ の変化, 特に一次近似的に過大荷重直後の $K_{\max,l}$ 下でのき裂先端の開口変位 $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}$ で評価できると考えられる。図6に $K_{\max,h}$, $K_{\min,h}$ の各種組合せのもとでの $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}$ を示す。 $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}$ も, $K_{\max,h}$ が大きくなると大きくなり, $K_{\min,h}$ が小さくなると小さくなり, 両者の影響を同時に受けている。図7, 8 (▲, ●, ▼印) にそれぞれ両振りと片振りの場合について遅延期間 N_D と $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}$ との関係を示す。その中では, 基準荷重 $K_{\max,l}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0}=0.125$ の場合について特に詳しい解析 ($K_{\max,h}$, $K_{\min,h}$ の各種組合せ: $K_{\max,h}/K_{\max,l}=1\sim2$, $K_{\min,h}/K_{\max,l}=0\sim3$) を行った。得られた計算点は図7, 8中に示すようにほぼ一つの狭い帯に集まる。すなわち, この場合の遅延期間 N_D は主に $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}$ によって評価できることが分かる。なお, 基準荷重が変化する場合をも考慮に入れるため, 図7, 8中の横軸は $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}$ と基準荷重の $\delta_{\text{tip}}^{\max,c}$ の定常値 $\delta_{\text{tip}}^{\max,c}$ と比で表している。それは, 小規模降伏条件が近似的にみたされていれば, 基準荷重の大きさが変わっても, もし過大荷重の $K_{\max,h}/K_{\max,l}$ と $K_{\min,h}/K_{\max,l}$ の値がそれぞれ同じなら, 相似則によってほぼ同じ $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}/\delta_{\text{tip}}^{\max,c}$ がえられ (図6), さらに同じ理由で

図6 過大荷重直後の $K_{\max,l}$ 下でのき裂先端の開口変位 $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}$

図7 遅延期間 N_D (基準荷重が両振りの場合)

図8 遅延期間 N_D (基準荷重が片振りの場合)

遅延期間 N_D もほぼ同じになると考えられる^{*1}からである。図 7, 8 には、基準荷重 $K_{\max,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0}=0.1$ と 0.15 の場合の各 $K_{\max,h}$, $K_{\min,h}$ の組合せについて得られた計算点も示してあるが、それらも $K_{\max,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0}=0.125$ の計算点が集まった帯にほぼのっている。したがって、単一過大荷重の場合の遅延期間 N_D は主に $\delta_{\text{tip}}^{\max,*}/\delta_{\text{tip}}^{\max,c}$ によって整理できると結論される。

3.2 階段状に荷重が下降する場合 図 9 に荷重が階段状に下降した後のき裂開閉口レベルの変化を示す。荷重が下降した後、き裂の開閉口レベルは最初に上昇して、極大値（基準荷重の対応する定常値より大きい）に達してから徐々に低下して定常値に近づいてゆく、また $K_{\max,h}$ が大きくなるにつれてき裂開閉口レベルの上昇程度は大きくなり、 $K_{\min,h}$ が小さくなるにつれてそれは下降する。これらの特徴は単一過大荷重の場合と同様である。しかし、き裂開閉口レベルが荷重変化直後でも低下せず、そのまま上昇してゆくことと、 $K_{\min,h} > K_{\min,l}$ の範囲での $K_{\min,h}$ の変化もき裂の開閉口レベルに影響を及ぼす（図 9 中の $K_{\max,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0}=0.1875$ の時の $K_{\min,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0}=0$ と -0.1 の場合）ことが、単一過大荷重の場合と異なっている。これについて、き裂開閉口挙動を直接支配する、き裂先端の開口変位 $\delta_{\text{tip}}^{\max}$ とき裂先端のき裂面に付着する残留ストレッチ $\delta_{R,\text{tip}}$ の変化を通じて検討する。図 10 はき裂の伝ばに伴う $\delta_{\text{tip}}^{\max}$ と $\delta_{R,\text{tip}}$ の変化を示すものである。前段階の大荷重によって残された引張りの残留塑性ひずみのために、荷重変化後の $\delta_{\text{tip}}^{\max}$ は基準荷重のその定常値より大きく、その後、き裂の伝ばによって徐々に減少して定常値に近づいてゆく。この

図 9 荷重が下降した後の K_{cl} の変化

^{*1} 本解析では、塑性誘起き裂閉口現象だけを考えた。実際の疲労き裂においては、基準荷重が小さいとき伝ば速度が小さくなると、酸化物および破面粗さなどがき裂閉口現象に及ぼす影響は、基準荷重が大きい場合より大きくなって、それによってき裂伝ば速度がさらに低下させられ、同じ $K_{\max,h}/K_{\max,l}$, $K_{\min,h}/K_{\max,l}$ にしても、 ΔK_I が小さいほどさらに長い N_D を必要とすると思われる。

特徴は単一過大荷重の場合と同様である。しかし、この場合、前段階の履歴の影響としては、このき裂前方に残された残留塑性ひずみのほかに、荷重が下降する前のき裂面に付着した残留ストレッチが前段階の荷重レベルに対応するものであることも荷重変動後のき裂開閉口挙動に影響を及ぼしている。これは、単一過大荷重の場合と階段状に荷重が下降する場合とのき裂開閉口挙動における差異の原因である。すなわち前者の場合、荷重変動前の $\delta_{R,\text{tip}}$ は常に変動後の定常値と同様であり、荷重変動後それは大きくなった $\delta_{\text{tip}}^{\max}$ の変化に従って上昇してから下降する。これに対して、後者の場合、荷重変動前の $\delta_{R,\text{tip}}$ は大荷重レベルに対応しているため大きい、荷重変動後それは小荷重の $\delta_{R,\text{tip}}$ の定常値に向って単調に減少していく。したがって、階段状に荷重が下降する場合には、荷重変動後のき裂開閉口レベルの低下は見られない。また、図 10 にも示したように、 $K_{\min,h}$ が変化すると、荷重変動前の $\delta_{R,\text{tip}}$ が異なる。それによって、荷重変動後の $\delta_{R,\text{tip}}$ も異なる値から出発して変化してゆき、 $K_{\min,h} \geq K_{\min,l}$ であっても、き裂が異なる開閉口挙動を示すことになる。なお、両者における $\delta_{R,\text{tip}}$ の異なる変化過程からも、階段状に荷重が下降する場合、荷重変動後のき裂開閉口レベル上昇の程度が単一過大荷重の場合より大きいことが理解される。図 9 中 $K_{\max,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0}=0.1875$, $K_{\min,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0}=0$ の場合、荷重変動後のき裂がわずか $0.004a_0$ だけ伝ばした後、 $K_{cl}/K_{\max,l}$ はすでに 1 となってき裂が停留してしまう。また、表 1 にも荷重変動後の過渡過程における $K_{cl}/K_{\max,l}$ の極大値を例としてこのことを示している。なお、遅延期間 N_D についても、図 7, 8 (○印) に示すように、

図 10 荷重が下降した後のき裂伝ばに伴う $\delta_{\text{tip}}^{\max}$, $\delta_{R,\text{tip}}$ の変化

^{*2} $K_{\min,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0}=-0.125$ の場合の $\delta_{\text{tip}}^{\max}$ は、 $a/a_0=1.0$ の近傍で $K_{\min,h}/\sigma_s\sqrt{\pi a_0}=0$ の場合のそれよりやや小さいが、図 10 では両曲線はほぼ重なっている。

表 1 過渡過程における $K_{cl}/K_{max,l}$ の極大値

		Stress ratio $R_L = R_h = -1$					
$K_{max,h}/K_{max,l}$		1.20	1.36	1.50	1.60	1.80	2.00
$(\frac{K_{cl}}{K_{max,l}})_{max}$	Single peak overload	.526	.598	.664	.703	.763	.804
	Two step load	.737	.867	.947	.980	1.00	1.00

階段状に荷重が下降する場合の方が N_D は大きい。図 7, 8 においても、一応 N_D を $\delta_{tip}^{max,*}/\delta_{tip}^{max,c}$ の関数として表しているが、図からも分かるように、このようにしてえられた計算点のばらつきは単一過大荷重の場合より大きい。このことは、荷重が階段状に下降する場合において、前段階荷重のもう一つの影響である、 $K_{max,h}$, $K_{min,h}$ の異なる組合せによって異なってくる荷重変動前の $\delta_{R,tip}$ も遅延期間 N_D にも大きい影響を及ぼすことを反映している。

最後に、単一過大荷重の場合と階段状に荷重が下降する場合におけるき裂開閉口挙動の差異が基準荷重になる前の $\delta_{R,tip}$ の差異によることを考慮して、一定振幅荷重に過大荷重が挿入される繰返し数 n_h の影響を考えてみる。単一過大荷重の場合と階段状に荷重が下降する場合とが、それぞれ $n_h=1$ と $n_h=\infty$ の場合に対応していることから想像できるように、 n_h の増加による影響は、基準荷重になる前の $\delta_{R,tip}$ が n_h によって増加することによるものである。このことを反映して、荷重変動後のき裂開閉口レベルの上昇程度は n_h の増加に伴って大きくなり、遅延期間 N_D も図 7, 8 の矢印で示すように、 n_h の増加とともに単一過大荷重の場合の N_D から階段状に荷重が下降する場合の N_D へ変化していく。

4. 結 論

一定振幅荷重に単一過大荷重が挿入される場合と階段状に荷重が下降する場合について、拡張した体積法を用いたき裂開閉口挙動のシミュレーション解析を行い、荷重変動後のき裂伝ばの遅延現象が Dugdale モデルを利用した塑性誘起き裂開口の解析によって説明できることを確認するとともに、次のような結論を得た。

(1) 単一過大荷重の場合と階段状に荷重が下降する場合との荷重変動後のき裂開閉口レベルに関する両者共通の特徴は、その開閉口レベルが最初に基準荷重に対応する定常値の上まで上昇し、その後徐々に定常

値に戻っていくことである、両者における差異は次のとおりである。

(a) 前者の場合、過大荷重直後、き裂開閉口レベルはいったん大きく低下する。

(b) 前者の場合、 $K_{min,h} \geq K_{min,l}$ の範囲内での $K_{min,h}$ の変化は荷重変動後のき裂開閉口挙動に影響を及ぼさない。

(c) 同じ $K_{max,h}/K_{max,l}$, $K_{min,h}/K_{max,l}$ にしても、荷重変動後のき裂開閉口レベルの上昇の程度は前者におけるより後者において大きい。

(2) 過大荷重がその後のき裂開閉口挙動に及ぼす影響は $\delta_{tip}^{max,*}$ と $\delta_{R,tip}$ の変化を通じて現れるものである。過大荷重がき裂前方に大きい引張りの残留塑性ひずみを残すために、過大荷重後の $\delta_{tip}^{max,*}$ と $\delta_{R,tip}$ はともに大きくなる。そのとき、 $\delta_{tip}^{max,*}$ に対する $\delta_{R,tip}$ の割合が大きくなるのがき裂開閉口レベル上昇の理由である。

(3) 単一過大荷重の場合、過大荷重の影響は、き裂前方に残された残留塑性ひずみだけである。したがって、大小荷重の上・下限の種々の組合せについて、この場合の遅延期間 N_D はパラメータ $\delta_{tip}^{max,*}/\delta_{tip}^{max,c}$ でほぼ整理できる。

(4) 荷重が階段状に下降する場合、過大荷重の影響としては、結論(3)に述べた残留塑性ひずみのほかに、異なる $K_{max,h}$, $K_{min,h}$ によって、基準荷重になる前のき裂面に付着した残留ストレッチの厚さが異なることがあり、その両者が荷重変動後のき裂開閉口挙動に影響を及ぼしている。このことが単一過大荷重の場合と階段状に荷重が下降する場合とのき裂開閉口挙動や遅延効果(遅延期間 N_D)における差異の原因である。

文 献

- (1) 例えば、城野・ほか 3 名, 材料, 32-363 (昭 58), 91.
- (2) 小倉・ほか 3 名, 機論, 42-358, A (昭 51), 1615.
- (3) 陳・西谷, 機論, 51-462, A (昭 60), 571.
- (4) 西谷・陳, 機論, 51-465, A (昭 60), 1436.
- (5) 陳・西谷, 材料, 35-394 (昭 61), 785.
- (6) 陳・西谷, 機論, 52-481, A (昭 61), 2174.
- (7) Elber, W., ASTM Spec. Tech. Publ., 486 (1971), 230.
- (8) 例えば, Trebules, V. W. Jr., ほか 2 名, ASTM Spec. Tech. Publ., 536 (1973), 115.
- (9) 例えば, Wei, R. P. and Shih, T. T., Int. J. Fract., 10-1 (1974), 77.

討 論

〔質問〕 白鳥正樹〔横浜国立大学工学部〕

質問者らも以前に残留ストレッチを考慮したBCSモデルに基づき解析を行い、応力変動に伴う加速効果および遅延効果をうまく表現し得るモデルであることを示している(付1)。本論文におけるモデルでは質問者らが提案したモデルに対していかなる点が改善されたのかお示しいただければ幸いである。

〔回答〕 変動荷重のもとでのき裂開閉口挙動を検討するためには、除荷するときのき裂面に付着した残留ストレッチの再圧縮を考慮し、1サイクル中におけ

(付1) 白鳥・ほか3名, 材料, 26-287 (昭52), 753.

る'き裂の開閉口挙動のシミュレーション解析を行わなければならない。すなわち、最小荷重 $\sigma_{\min}$ 時の残留ストレッチおよび応力状態を求めなければ、次の最大荷重 $\sigma_{\max}$ 時のき裂開口変位、き裂先端での塑性域などもとめられない(荷重が大荷重から小荷重に変動する場合)。そこで、本研究では、拡張した体積力法の手法を用いて、1サイクル中における'き裂開閉口挙動を含め、き裂伝ばのシミュレーション解析を行った。その結果によると、荷重変動後のき裂開閉口挙動はき裂開口変位と残留ストレッチあつさの変化の総合的な関係によるものである。