(昭和52年11月 日本造船学会秋季講演会において講演)

ランダム荷重下での疲労亀裂伝播 (第1報)

——単一および多重の過大荷重による疲労亀裂伝播の遅延現象——

正員 川 原 正 言* 正員 岩 崎 紀 夫*

Fatigue Crack Growth under Random Loading (1st Report)

——Fatigue Crack Growth Retardation following Single,
Multiple and Intermittent Overloads——by Masanori Kawahara, *Member* Toshio Iwasaki, *Member*

Summary

The importance of fatigue analysis under service loading conditions has recently been recognized in design of ship structure, offshore structure, pressure vessel and so on. But fatigue crack growth retardation following overloads is now an obstacle to the accurate prediction of fatigue life of structural components.

In the present study, an experimental analysis was conducted on fatigue crack growth following single, multiple and intermittent overloads, as the first stage of fatigue analysis under random loading. Experimental results showed two eminent features: (1) the greater the overload is, the larger the crack growth retardation becomes (2) likewise, the larger the number of overload cycles is, the larger the crack growth retardation becomes. But in the case of intermittent overloads, the crack growth acceleration was observed when the interval between overloads was less than about 50 cycles.

The abrupt falling of the crack growth rate and its recovery was commonly observed in the retardation process. The model to predict the behaviour of crack growth following overloads was proposed assuming a bilinear relation between the effective stress intensity range and the amount of crack growth. The model agrees well with experiments for the prediction of the number of cycles spent in retardation process.

記 号

a : 亀裂半長さ
 a_0 : 過大荷重負荷直後の亀裂半長さ
 a_1 : 亀裂伝播速度が最小となる亀裂半長さ
 a_2 : 遅延現象終了時の亀裂半長さ
 a_f : 過大荷重負荷直前の亀裂半長さ
 $a_{G.Y.}$: 試験片の全面降伏時の亀裂半長さ
 Δa_D : 亀裂伝播速度減少過程での亀裂進展量
 Δa^* : 遅延期間中の亀裂進展量
 C : Paris 則の定数
 ΔK : 応力拡大係数範囲
 ΔK_{eff} : 遅延期間中の等価応力拡大係数範囲
 m : Paris 則の指数
 N : 繰返し数
 N^* : 遅延期間中の総繰返し数
 N_0 : 基準応力のみで亀裂が a_0 から Δa^* 進展する

のに要する繰返し数

 $N_D: N^* - N_0$ N_P : 連続した過大荷重の繰返し数 ΔN_P : 過大荷重の繰返し間隔 W : 試験片幅 da/dN : 亀裂伝播速度 $(da/dN)_{min}$: 最小亀裂伝播速度 $(da/dN)_{a_1}$: 過大荷重が負荷されない場合の亀裂長さ a_1 における亀裂伝播速度 $\Delta \sigma_1$: 基準応力範囲 $\Delta \sigma_P$: 過大応力範囲 σ_Y : 降伏応力 ρ^+ : 引張塑性域長さ ρ^- : 圧縮塑性域長さ

1 緒 言

近年、航空機はもとより、船舶、海洋構造物あるいは圧力容器、橋梁などの陸上構造物の疲労設計において、

* 日本鋼管(株)技術研究所

疲労寿命のより正確な推定ならびに検査期間のより適切な設定などのために、その構造物の実働荷重下での疲労亀裂の発生、伝播の問題が非常に重要視されるようになってきた。

現在までの変動荷重下での疲労強度解析法としては、Miner の累積被害則あるいはこれと等価な Paris の亀裂伝播則の積分といった線形重ね合わせの方法が用いられているが、これらの方法はいずれも大小の荷重の順序ならびにそれらの相互干渉を考慮していないために、疲労寿命の推定結果は実際とかけはなれていることが多い。

最近になって、欧米の航空機の安全性評価の分野が中心となって、航空機の実働荷重をシミュレートしたランダム疲労試験が比較的系統立てて実施されるようになり、ランダム荷重下での疲労亀裂の発生、伝播現象を破壊力学を用いて解析し、さらに統計的な取扱いとを結び付けた信頼性解析も検討されるようになった。このような構造物の安全性の評価方法は、今後航空機に限らず、船舶、海洋構造物あるいは压力容器などに対しても、フェールセーフ設計、メンテナンスフリー設計などの形で取入れられるものと考えられる。

ランダム荷重下での疲労強度解析には、疲労亀裂の発生の問題とともに、その伝播過程が重要になると考えられるが、後者の最も困難な問題点として、大小の荷重の負荷順序およびその相互干渉による亀裂伝播現象の乱れが考えられる。とりわけ、引張り過大荷重が作用した場合の亀裂の伝播に生じる遅延現象は、Miner 則を用いた推定では非常に安全側過ぎるとされており、現在の変動荷重下での亀裂伝播の推定に大きな障害になっていると思われる。

引張りの過大荷重による亀裂伝播の遅延現象については、最近主として航空機材料であるアルミニウム合金についての実験が数多く実施され、遅延現象に及ぼす各種要因の定性的な傾向は徐々に明らかにされつつあるが^{1),2),3)}、その定量的な評価やランダム荷重への応用などの点でまだ明らかにされていない問題も多い。遅延現象の定量的な評価の試みとしては、Wheeler⁴⁾、Willenborg⁵⁾らの過大荷重負荷時の亀裂前方に形成される引張り塑性域寸法に注目したモデル、あるいは Elber⁶⁾の亀裂先端の開閉挙動に注目したモデルなどがあり、現在のところ、後者の crack closure モデルが、delayed retardation を含めた遅延現象を定性的にうまく説明できるとされているが、実際の亀裂開口応力の算定には困難な点が多い。

本研究は、鉄鋼材料のランダム荷重下での疲労亀裂伝播現象の解析の第1段階として、上述の引張り過大荷重が作用した場合の疲労亀裂伝播に生じる遅延現象につい

て考察した。具体的には、船体構造用高張力鋼と同一強度を有する SM 50 B を用いて、過大荷重の大きさとその繰返し数を種々変化させた疲労亀裂伝播実験を行ない、各種パラメータの遅延現象に及ぼす影響について検討し、ランダム荷重にも応用可能な遅延期間中の亀裂伝播モデルの作成を試みた。また、この解析モデルを用いて、過大荷重が一定期間ごとに繰返し負荷される場合の疲労亀裂伝播を推定し、Miner 則による推定との比較検討を行なった。

2 実 験

2.1 実験の種類

引張り過大荷重による疲労亀裂伝播の遅延現象を調べるために、Fig.1 に示すような3つのシリーズの実験を行なった。Fig.1(a) は、過大荷重の大きさの影響を調べるための実験であり、基準応力 ($\Delta\sigma_1=10$ あるいは 12 kg/mm^2) の繰返しの途中に、1 サイクルだけ $\Delta\sigma_p=(1.2\sim 2.5)\Delta\sigma_1$ の過大応力を負荷している。Fig.1(b) は、過大荷重の繰返しの影響を調べるための実験であり、 $\Delta\sigma_1=12 \text{ kg/mm}^2$ に対して、 $\Delta\sigma_p=(1.3\sim 2.0)\Delta\sigma_1$ の過大応力を $N_p=10\sim 10^4$ サイクル連続して負荷している。また、Fig.1(c) は、過大荷重が一定期間ごとに負荷される場合の効果を調べるための実験であり、 $\Delta\sigma_1=12 \text{ kg/mm}^2$ に対して、 $\Delta\sigma_p=1.5\Delta\sigma_1$ の過大応力を $\Delta N_p=10\sim 5\times 10^4$ サイクルごとに1 サイクルだけ負荷している。

Fig.1 Single, Multiple and Intermittent Overloads Patterns

Table 1 Chemical Compositions and Mechanical Properties

Chemical Composition %					Mechanical Properties		
C	Si	Mn	P	S	Y. P. kg/mm ²	T. S. kg/mm ²	El. G.L.+50 %
0.15	0.36	1.31	0.024	0.012	32.1	52.0	33.5

Fig. 2 Dimensions of Center Notched Tension Specimen

2.2 供試材ならびに実験方法

供試材としては、板厚 20mm の SM 50 B を用いた。化学成分ならびに機械的性質を Table 1 に示す。

試験片は、Fig. 2 に示すように、その引張り方向を板の圧延方向に一致するように採取し、かつ被試験部の板厚を 10mm に減厚した板幅 120 あるいは 140mm の中央切欠型のものである。初期切欠は、切欠長さ $2a=20$ mm, 切欠先端半径 0.1mm の機械切欠である。

疲労試験は 200 トン油圧サーボ式疲労試験機により、完全片振りの荷重制御方式で行ない、その繰返し速度は基準応力に対しては 7Hz, 過大応力に対しては 1Hz である。なお、過大応力の負荷は、初期切欠から基準応力によって若干の疲労亀裂の進展が認められた後に行なっている。

疲労試験時の亀裂長さの測定は、左右の初期切欠の先端に 1mm あるいは 0.2mm 間隔のクラックゲージを貼付し、亀裂進展にともなうクラックゲージの出力電圧の変化を X-T レコーダーに記録させる方法により行なった。このようにして測定された亀裂長さは、あくまで試験片表面のものであり、板厚中央部では表面に比べ約 1.0~1.5mm 程度の亀裂の先行が認められたが、今回の遅延現象の検討には、すべて試験片表面での亀裂長さをを用いている。

また、亀裂伝播速度の算出は、左右の亀裂長さの平均値と繰返し数の関係のグラフから、亀裂長さ 0.2mm ごとにこの曲線を数値微分する方法で行なった。

3 実験結果と考察

3.1 過大荷重による疲労亀裂伝播の遅延現象

Fig. 1(a) に示した基準応力の繰返しの中に 1 サイクルだけ過大応力が負荷された場合の亀裂伝播曲線を Fig. 3 に示す。疲労亀裂の伝播は、過大応力が負荷されてまもなく、それ以前に比べて非常にゆっくりとしたものになっており、過大応力が負荷されない場合に比べて疲労亀裂の伝播に遅延現象の生じていることがわかる。

この疲労亀裂伝播の遅延現象は、亀裂伝播速度の変化を調べるによりさらに明確に表現できる。Fig. 4 は Fig. 3 に示した亀裂伝播曲線のうち $\Delta\sigma_p=2.0\Delta\sigma_1$ の場合の亀裂伝播速度と亀裂長さの関係を表わしたものである。

Fig. 3 Crack Length versus Applied Cycles in Single Overload Tests

Fig. 4 Crack Growth Rate through the Overload Retardation Region in Single Overload Test

Fig. 5 Crack Length versus Applied Cycles under Intermittent Overloads Tests

る。Fig. 4 において、過大応力は $a=15.0\text{mm}$ で負荷されており、この時点で亀裂伝播速度は一旦不連続的に加速されるものの過大応力負荷直後から急速に減少し、 $a=16.5\text{mm}$ で亀裂伝播速度は最小値をとり、過大応力が負荷されない場合（破線）に比べて $1/10$ 以下の速度となっている。このように最小亀裂伝播速度が過大応力負荷直後ではなく、亀裂がわずかに進展してから生じる現象は、delayed retardation と呼ばれている。これ以後、遅延現象は回復過程に入り亀裂伝播速度も徐々に増大し、 $a=36.0\text{mm}$ で過大応力が負荷されない場合の伝播速度に一致して遅延現象は終了している。

なお、Fig. 4 において破線で示した亀裂伝播速度は、過大応力が負荷されない一定振幅の基準応力に対するものであり、Paris の亀裂伝播則にあてはめると、亀裂伝播速度が $10^{-5} \sim 10^{-3} \text{mm/cycle}$ の範囲で次式のように表現できる。

$$da/dN = C \cdot (\Delta K)^m \quad (1)$$

$$= 1.85 \times 10^{-12} \cdot (\Delta K)^{8.90} \quad (2)$$

また、Fig. 3 からわかるように、過大荷重が大きくなるにつれて遅延期間も長くなっているが、Fig. 1(b) に示した荷重パターンでの実験からは、たとえ過大荷重の大きさが同じであってもその繰返し数が多くなるほど遅延期間も長くなる結果が得られている。

つぎに、Fig. 1(c) に示した一定期間ごとに過大荷重が作用する場合の亀裂伝播曲線を Fig. 5 に示す。過大応力の繰返し間隔が長い場合には、過大応力の負荷されない場合あるいは同一過大荷重でも 1 サイクルの負荷の場合 (Fig. 3) よりも亀裂の伝播は遅くなっている。しかしながら、 $\Delta N_p = 10$ サイクルと過大応力の繰返し間隔が短い場合には、亀裂の伝播は過大応力の負荷されない場合より逆に速くなっている。

3.2 遅延期間中の亀裂進展量と亀裂伝播速度

Figs. 3, 4 の実験結果から、Fig. 1(a), (b) に示した 1 サイクルあるいは何サイクルかの連続した過大荷重が負荷された場合の亀裂伝播の遅延現象を Fig. 6 に模式的に示す。ここでは、Fig. 6 における遅延期間中の亀裂進展量 Δa^* 、最小亀裂伝播速度 $(da/dN)_{\min}$ 、およびそれまでの亀裂進展量 Δa_D について考察する。なお、Fig. 1(b) の連続した過大荷重負荷の場合には、Fig. 6 の A 点の亀裂長さ a_0 はその最終サイクルでの値を用いている。

まず最初に遅延期間中の亀裂進展量 Δa^* について考察する。Wheeler⁴⁾、Willenborg⁵⁾ らは、 Δa^* を過大応力負荷時の亀裂先端に形成される引張塑性域寸法と関係付けているが、ここでも Dugdale 模型から計算される塑性域寸法と関係付けて検討した。すなわち、遅延現象は過大応力負荷時に生じた亀裂前方の引張塑性域の先端と、過大応力負荷後亀裂が進展して基準応力による亀裂前方の引張塑性域の先端とが一致した時点で終了し、かつ、この時点で基準応力による引張塑性域の大きさは過大応力の影響を受けないと仮定すると、遅延現象終了時の亀裂長さ a_2 は次のように求めることができる。

$$a_0 + \rho_{\sigma p}^+ = a_2 + \rho_{\sigma_1}^+ \quad (3)$$

(3) 式の右辺、左辺は、それぞれ有限幅 Dugdale 模型 $\sin(\pi a/W)/\sin\{\pi(a+\rho^+)/W\} = \cos(\pi\sigma/2\sigma_Y)$ (4)

から求められる。なお、今回の疲労試験は完全片振りの条件であるため、応力の範囲と最大値は一致して、 $\Delta\sigma_1 = \sigma_1$ 、 $\Delta\sigma_p = \sigma_p$ と表現できることから、 a_2 および Δa^* は次式のように表わすことができる。

$$a_2 = \frac{W}{\pi} \sin^{-1} \left\{ \sin(\pi a_0/W) \cdot \frac{\cos(\pi\sigma_1/2\sigma_Y)}{\cos(\pi\sigma_p/2\sigma_Y)} \right\} \quad (5)$$

$$\Delta a^* = a_2 - a_0 \quad (6)$$

Fig. 6 Schematic Illustration of Fatigue Crack Growth Retardation

Fig.7 Comparison between Measured and Calculated Values of Crack Growth Amount in Total Retardation Process

Fig.7 に、Fig.1(a), (b) の実験から得られたさまざまな大きさの $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_P$, a_0 に対する Δa^* の実測値と、(5), (6) 式からの計算値の比較を示す。 Δa^* の実測値は、それぞれの実験における Fig.4 と同様なグラフから求めており、過大応力の荷重によって試験片の全面降伏したデータは除外している。Fig.7 において、 Δa^* の実測値と計算値は、1 サイクルだけの過大荷重負荷の場合のみならず、連続した過大荷重負荷の場合に対しても良く一致しており、 Δa^* を計算する際の仮定が妥当なものであったと推察される。

次に、Fig.6 における亀裂伝播速度の減少期間中の亀裂進展量 Δa_D 、および B' 点で示される最小伝播速度 $(da/dN)_{\min}$ について検討する。delayed retardation の原因として、Elber⁶⁾ は crack closure の考えから、過大荷重負荷後の圧縮残留応力がこの領域への亀裂進展に対してその開口応力を徐々に遅らせるためと説明している。また最近、FEM による亀裂開閉挙動の解析も行なわれているが^{7),8)}、現在のところこの現象の定量的な評価は困難と考えられるので、ここでは Δa_P , $(da/dN)_{\min}$ を実験式的に求めた。

Euw ら⁹⁾によれば、 Δa_D は過大荷重負荷時の引張塑性域寸法の 1/4~1/8 程度の長さであり、過大荷重が連続して負荷される場合には delayed retardation は生じないとされている。今回の実験では、過大応力除荷時の圧縮塑性域寸法に関係したパラメータ $2\rho_{\sigma_P}/(\sigma_P/\sigma_1)^2$ を用いれば、 Δa_D の実測値とこのパラメータは Fig.8 に示すように比較的良好な相関がある。しかしながら、このパラメータに対する物理的な意味は不明である。Fig.8 において、○印の右肩に示した数字は過大応力の繰返し数を表わしており、数字の表示がない○印のデータは過

Fig.8 Comparison between Measured and Calculated Values of Crack Growth Amount in Rate Falling Stage in Retardation Process

大応力の繰返し数が 50 または 10 サイクルのものである。Fig.8 より過大応力の繰返し数が 10^3 サイクル以下ならば、1 サイクルの過大応力荷重の場合と同様上述のパラメータで Δa_D を推定できるが、過大応力の繰返し数が 3×10^3 サイクル程度に多くなると、Euw らの報告と同様 Δa_D の実測値は小さくなり、上述のパラメータからの推定では Δa_D を過大評価する結果となる。

なお、次節以降での遅延期間中の繰返し数を求める際の解析モデルでは、 Δa_D として次式の実験式を用いている。

$$\Delta a_D = a_1 - a_0 = 2\rho_{\sigma_P}/(\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1)^2 \quad (7)$$

また、最小亀裂伝播速度 $(da/dN)_{\min}$ は、その亀裂長さ a_1 において過大荷重が作用しない場合にとっていたであろう亀裂伝播速度 $(da/dN)_{a_1}$ との比をとると、1 サイクルの過大荷重負荷の場合 Fig.9 に示すように、 a_0 によらない $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$ の比のみに依存する量として表わすことができ、その大きさは、 $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$ の比に対して指数関数的に減少している。過大荷重が連続して負荷さ

Fig.9 Effect of Ratio, $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$ on Minimum Value of Crack Growth Rate at the End of Rate Falling Stage in Retardation Process

Fig. 10 Effect of Number of Overload Cycles on Minimum Value of Crack Growth Rate at the End of Rate Falling stage in Retardation Process

れる場合には、 $(da/dN)_{\min}/(da/dN)_{a_1}$ の比は、1 サイクルの過大荷重負荷のものよりさらに小さくなり、Fig. 10 に示すように N_p の増加とともに減少している。Figs. 9, 10 から、 $(da/dN)_{\min}$ は次式のような実験式で表示できる。

$$(da/dN)_{\min} = 8.33 \cdot N_p^{0.17} \cdot \exp[-2.12 \cdot (\Delta\sigma_p/\Delta\sigma_1)] \times (da/dN)_{a_1} \quad (8)$$

3.3 遅延期間の推定

過大荷重による疲労亀裂伝播の遅延現象を定量的に評価し、この現象を構造物の疲労設計に応用するためには、Fig. 6 に示した遅延期間中 ABC での総繰返し数 N^* を求めておく必要がある。 N^* の評価に対しては、Wheeler⁴⁾、Willenborg⁵⁾ らのモデルでは delayed retardation が考慮されておらず、また Elber⁶⁾ らのモデルでは Fig. 1(c) に示した過大応力が一定期間ごとに作用する場合への応用は困難と考えられる。そこでここでは、遅延現象を亀裂伝播速度の減少期間と回復期間の 2 つに分類し、それぞれの期間で亀裂伝播速度が亀裂長さに対して上に凸の曲線に変化している実験事実 (Fig. 4) から、これらの期間で等価な ΔK 値が亀裂長さに対して直線的に減少および増大すると仮定し、以下に示すような方法で N^* を求めるモデルを作成した。

まず Fig. 6 の A' 点、すなわち過大荷重負荷時の亀裂伝播速度は過大応力変動幅 $\Delta\sigma_p$ に対応する値にまで不連続的に上昇すると仮定すれば、A' 点での等価な ΔK 値は次式のように表わすことができる。

$$\Delta K_{A''} = \Delta\sigma_p \sqrt{\pi a_0} \sqrt{\sec(\pi a_0/W)} \quad (9)$$

また、最小亀裂伝播速度を与える点 B' での等価な ΔK 値は、(8) 式から次のように計算できる。

$$\Delta K_{B'} = [8.33 \cdot N_p^{0.17} \cdot \exp\{-2.12(\Delta\sigma_p/\Delta\sigma_1)\}]^{1/m} \times \Delta\sigma_1 \sqrt{\pi a_1} \sqrt{\sec(\pi a_1/W)} \quad (10)$$

遅延終了時 C' 点での等価な ΔK 値は、過大荷重の影響がなくなっていることから、次式のように与えられる。

$$\Delta K_{C'} = \Delta\sigma_1 \sqrt{\pi a_2} \sqrt{\sec(\pi a_2/W)} \quad (11)$$

そして、Fig. 6 の A'B', B'C' 間で等価な ΔK 値が亀裂長さに対してそれぞれ直線的に減少および増大すると仮定すれば、それぞれの区間での ΔK_{eff} 値は次式のようになる。

$$a_0 \leq a \leq a_1 :$$

$$(\Delta K_{\text{eff}})_{A'B'} = \frac{\Delta K_{B'} - \Delta K_{A''}}{a_1 - a_0} (a - a_0) + \Delta K_{A''} \quad (12)$$

$$a_1 \leq a \leq a_2 :$$

$$(\Delta K_{\text{eff}})_{B'C'} = \frac{\Delta K_{C'} - \Delta K_{B'}}{a_2 - a_1} (a - a_1) + \Delta K_{B'} \quad (13)$$

したがって、遅延期間中の総繰返し数 N^* は次式のように計算できる。

$$N^* = \int_{a_0}^{a_1} \frac{da}{C(\Delta K_{\text{eff}})_{A'B'}^m} + \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{C(\Delta K_{\text{eff}})_{B'C'}^m} \quad (14)$$

Fig. 11 に、Fig. 1(a), (b) の実験に対する N^* の実測値と計算値の比較を示す。計算値は、それぞれの実験における a_0 , $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_2$, N_p を与えて (14) 式を数値積分して求めている。Fig. 11 から、過大荷重の負荷回数が 1 サイクルの場合のみならず、連続した多数回の場合でも N^* の実測値と計算値は良く一致しており、今回のモデル作成にあたっての各仮定がほぼ妥当なものと考えられる。

3.4 遅延現象に及ぼす各種パラメータの影響

3.3 節で導びかれたモデルから、遅延現象に及ぼす

Fig. 11 Comparison between Measured and Calculated Value of Number of Cycles Spent in Total Retardation Process

Fig. 12 Relation between Ratio, $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$ and Ratio N^*/N_0

Fig. 13 Relation between Number of Overload Cycles and Ratio, N^*/N_0

$\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_P$, N_P , a_0 の影響について考察し、実験結果と比較検討した。

今、遅延の程度を表わすパラメータとして、過大応力の荷重による遅延期間中の繰返し数 N^* と過大応力が荷重されず基準応力のみで亀裂が a_0 から Δa^* 進展するのに要する繰返し数 N_0 との比で定義する。そして前節のモデルを $W \rightarrow \infty$ とした無限板の場合について考察すると、 N^*/N_0 は、 $\Delta\sigma_1$, $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$, N_P に依存する量となり、 a_0 に対しては N^* , N_0 とともに $a_0^{1-(m/2)}$ に比例することからその影響はなくなる。また有限板についての数値計算でも、 N^*/N_0 に対する a_0 の影響はほとんどない結果が得られている。

Fig. 12 は、1 サイクルの過大荷重負荷の場合について、 N^*/N_0 に及ぼす $\Delta\sigma_P$ の影響について示したものである。図中の曲線は、今回の実験条件とほぼ同等な $\Delta\sigma_1 = 12 \text{ kg/mm}^2$, $a_0 = 15 \text{ mm}$, $W = 120 \text{ mm}$ および $\Delta\sigma_1 = 10 \text{ kg/mm}^2$, $a_0 = 15 \text{ mm}$, $W = 140 \text{ mm}$ の2条件で、前節に示したモデルから N^*/N_0 を計算したものであるが、この2条件ではほとんど差が表われていない。また

Fig. 14 Relation between Ratio, $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$ and Ratio, N^*/N_0 for Various Value of $\Delta\sigma_1$

各プロットは Fig. 1(a) の実験結果である。Fig. 12 より、遅延現象は $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$ の比が 1.3 程度から現われ始め、 $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$ の比の増大とともに遅延の程度も著しく大きくなっている。

過大応力の繰返し数 N_P の影響については、4.2 節で述べたように N_P の増加とともに $(da/dN)_{\min}$ の値が小さくなることから、Fig. 13 に示すように、遅延の程度は N_P の増加とともに大きくなっている。しかしながら、その影響の度合は、Fig. 12 に示した $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$ の比ほど著しくはないようである。

また、 $\Delta\sigma_1$ の影響について、ほぼ無限板と考えられる $W = 1000 \text{ mm}$ の場合に対して計算したのが Fig. 14 であり、 $\Delta\sigma_1$ が大きくなると遅延の程度も大きくなっている。

3.5 一定期間ごとに過大荷重が負荷される場合の亀裂伝播

Fig. 1(c) に示した一定期間ごとに同じ大きさの過大荷重が 1 サイクルだけ負荷される場合の亀裂伝播現象を、3.3 節で述べたモデルを応用して考察する。

今、 n 回目の過大応力負荷直前の亀裂長さを $a_{f,n-1}$ 、負荷直後の亀裂長さを $a_{0,n}$ 、この間の亀裂進展量を $\Delta a_{p,n}$ とし、 n 回目の過大応力負荷により予想される最小亀裂伝播速度とその亀裂長さ、および遅延現象終了時の亀裂長さをそれぞれ $(da/dN)_{\min,n}$, $a_{1,n}$, $a_{2,n}$ とする。そして Fig. 15 に示すように n 回目の過大応力が、 $n-1$ 回目の過大応力負荷による遅延現象の

- (1) 亀裂伝播速度の減少過程で負荷される場合
- (2) 亀裂伝播速度の回復過程で負荷される場合
- (3) 終了以降に負荷される場合

の3つに分類し、以下に示すような方法で n 回目から $n+1$ 回目の過大応力負荷の間の亀裂進展量と繰返し数の関係を求めた。

- (1) の場合： n 回目の過大応力負荷により、亀裂は

Fig.15 Crack Growth Behavior under Intermittent Overloads Tests

$a_{f,n-1}$ からその過大応力に対応した量だけ進展するが、過大応力負荷直後の亀裂伝播速度および ΔK_{eff} は過大応力の影響を受けず、過大応力負荷直前のそれらの値から変化しないと仮定する。そして新たに過大応力負荷直後の亀裂長さ $a_{0,n}$ に対して、(5), (7), (8) 式から $a_{1,n}, a_{2,n}, (da/dN)_{min,n}$ を求め、3.3 節のモデルと同様 $a_{0,n} \sim a_{1,n}, a_{1,n} \sim a_{2,n}$ の間で ΔK_{eff} が上述の仮定に示した過大応力負荷直前の値から直線的に変化すると、 $n+1$ 回目の過大応力負荷までの基準応力 $\Delta\sigma_1$ の繰返し ΔN_P による亀裂進展量を求めた。

(2) の場合： n 回目の過大応力負荷による亀裂進展量は (1) の場合と同様であるが、過大応力負荷直後の亀裂伝播速度および ΔK_{eff} は、過大応力負荷直前のそれらの値から不連続的に $(\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1)^m$ 倍および $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$ 倍上昇すると仮定する。 $a_{1,n}, a_{2,n}, (da/dN)_{min,n}$ の値は (1) の場合と同様に求め、 $a_{0,n} \sim a_{1,n}, a_{1,n} \sim a_{2,n}$ の間で ΔK_{eff} が過大応力負荷直前の値の $\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1$ 倍の値から直線的に変化すると、 $n+1$ 回目の過大応力負荷までの亀裂進展量を求めた。

(3) の場合： n 回目の過大応力負荷に対して、 $n-1$ 回目の過大応力による影響はないことから、3.3 節のモデルから亀裂進展量と繰返し数の関係を求めた。

以上の (1)~(3) の説明は次のように数式で表現できる。

$$a_{0,n} = a_{f,n-1} + \Delta a_{P,n} \quad (15)$$

$$\Delta a_{P,n} = C \{ \Delta\sigma_P \sqrt{\pi a_{f,n-1}} \times \sqrt{\sec(\pi a_{f,n-1}/W)} \}^m \quad (16)$$

(1) $a_{f,n-1} \leq a_{1,n-1}$ のとき、

$$(\Delta K_{eff})_{a_{0,n}} = (\Delta K_{eff})_{a_{f,n-1}} \quad (17)$$

(2) $a_{1,n-1} \leq a_{f,n-1} \leq a_{2,n-1}$ のとき

$$(\Delta K_{eff})_{a_{0,n}} = (\Delta\sigma_P/\Delta\sigma_1) \times (\Delta K_{eff})_{a_{f,n-1}} \quad (18)$$

$a_{1,n}, a_{2,n}$ はそれぞれ (7), (5) 式の a_0 を $a_{0,n}$ に置き換えて求め、 $(da/dN)_{min,n}$ に対応する ΔK_{eff} は (10) 式の a_1 を $a_{1,n}$ に置き換え、 $N_P=1$ として求めることができる。また、 $a_{0,n} \sim a_{1,n}, a_{1,n} \sim a_{2,n}$ 間の ΔK_{eff} は、(12), (13) 式と同様に求めることができる。したがって、 n 回目の過大応力負荷直後から $n+1$ 回目の過大応力負荷直前までの亀裂進展量 Δa_n は、過大応力の負荷間隔を ΔN_P

Fig.16 Comparison between Measured and Calculated Values of Crack Growth Life under Intermittent Overloads Tests

Fig.17 Prediction of Mean Crack Growth under Intermittent Overloads for Various Overload Interval, ΔN_P

とすれば次式のようになる。

$$\int_{a_{0,n}}^{a_{0,n}+\Delta a_n} \frac{da}{C(\Delta K_{\text{eff}})^m} = \Delta N_P \quad (19)$$

Fig.1(c)の実験に対し、上述のモデルを用いて亀裂が最初の過大応力負荷時の長さから過大応力の負荷によって試験片が全面降伏する亀裂長さまで進展するのに要する総繰返し数 N^* を計算し、実測値と比較したのが Fig.16 である。Fig.16 より実測値と計算値は良く一致しており、3.3 節で作成されたモデルが、繰返し負荷される過大荷重の場合に対しても適用可能であると思われる。

3.6 亀裂伝播に及ぼす過大荷重の繰返し間隔の影響

3.5 節で述べたモデルを用いて、過大応力の繰返し間隔 ΔN_P を種々変化させた場合の亀裂伝播曲線の計算例を Fig.17 に示す。Fig.17 の実線は $a_0=15\text{mm}$ で最初の過大応力が負荷されており、●印で試験片の全面降伏に至っている。また、破線は、基準応力あるいは過大応力に相当する一定応力振幅下での亀裂伝播を表わしている。Fig.17 からわかるように、 ΔN_P が長くなるにしたがって亀裂伝播は遅くなり、 $\Delta N_P=50$ サイクル以上になると、基準応力のみによる亀裂伝播よりも遅い遅延現象となっている。そして $\Delta N_P=10^4$ サイクル程度で遅延の程度は最も著しくなり、 $\Delta N_P=5 \times 10^4$ サイクルでは逆に遅延の程度は小さくなっている。これは、過大応力が、その前の過大応力による遅延現象の亀裂伝播速度の減少期間に負荷されるか、回復過程で負荷されるかの違いによるものであり、Fig.17 の計算条件では $\Delta N_P=10^4$ サイクル程度まで亀裂伝播速度の減少過程で次の過大応力が負荷されている。

次に、一定期間ごとに過大荷重が負荷される場合の亀

Fig.18 Comparison between the Life Estimation by Miner's Rule and that by the Present Model for Various Values of Overload Interval, ΔN_P and Initial Crack Length, a_0

裂伝播を、Miner 則によって推定した場合と遅延現象を考慮した3.5節のモデルによって推定した場合の比較を行なった。Fig.18 は、最初の過大応力負荷時の亀裂長さ a_0 をパラメータとして、亀裂が a_0 から過大応力によって試験片が全面降伏する亀裂長さ $a_{G.Y.}$ まで伝播するのに要する繰返し数を、今回のモデルで推定した N^* と Miner 則で推定した N_{Miner} の比で縦軸に表わし、横軸に ΔN_P をとって示したものである。計算条件は、Fig.1(c)の実験と同一の条件で行なっている。なお、Miner 則による N_{Miner} の計算は、 n を $(1+\Delta N_P)$ のブロックの繰返し数として(1)式のParisの亀裂伝播則を次式のように積分して求めた。

$$N_{\text{Miner}} = n(1+\Delta N_P) \quad (20)$$

$$n = \frac{\int_{a_0}^{a_{G.Y.}} \frac{da}{C(\Delta \sigma_1^m \Delta N_P + \Delta \sigma_P^m)} \sqrt{\pi a \sec(\pi a/W)}^m}{C(\Delta \sigma_1^m \Delta N_P + \Delta \sigma_P^m)} \quad (21)$$

Fig.18 の各プロットは Fig.1(c)の実験結果であり、右肩に示した数字は最初の過大応力負荷時の亀裂長さを表わしている。

Fig.18 は、 ΔN_P が小さい場合には、Miner 則による亀裂伝播の推定が非安全側の推定になり得ることを示している。

4 結 言

鉄鋼材料のランダム荷重下における疲労亀裂伝播の解析の第1段階として、引張り過大荷重による亀裂伝播の遅延現象について、(i)1サイクルの過大荷重の負荷による亀裂伝播(ii)連続した過大荷重の負荷による亀裂伝播(iii)一定期間ごとの過大荷重の負荷による亀裂伝播、の3つのシリーズの実験による検討を行ない、いずれの場合にも適用可能な解析モデルの作成を試みた。以下、得られた結論を示す。

上記の(i),(ii)の実験に対して

(1) 過大荷重負荷による亀裂伝播の遅延現象において、遅延期間中の亀裂進展量は過大応力負荷時の引張塑性域寸法と関係付けて求めることができる。また、遅延期間中の繰返し数は、亀裂伝播速度の減少過程と回復過程でそれぞれ等価な ΔK 値が亀裂進展量に対して直線的に減少および増大すると仮定した解析モデルにより推定が可能となった。

(2) 亀裂伝播の遅延の程度を N^*/N_0 のように遅延期間中の繰返し数と過大荷重が負荷されない場合の繰返し数との比で表現すれば、 N^*/N_0 の比は、過大応力変動幅と基準応力変動幅の比に最も大きな影響を受け、次に基準応力変動幅の大きさおよび過大応力の繰返し数に影響を受ける。しかしながら、過大応力負荷時の亀裂長さにはほとんど影響されない。

上記 (iii) の実験に対して

(3) 一定期間ごとに過大応力が負荷される場合の亀裂伝播は、過大応力がその前の過大応力負荷による遅延現象の亀裂伝播速度の減少期間に負荷されるか、回復期間に負荷されるかに分類して考えると、(1)に示した解析モデルを応用することにより推定が可能である。

(4) (iii)の実験では、亀裂の伝播は、過大応力の負荷間隔の長い場合には遅延現象が、50 サイクル以下の短い場合には逆に加速現象が生じている。後者の加速現象は、Miner 則から推定されるよりも速く、過大応力が負荷された場合の亀裂伝播に対して、Miner 則による推定が非安全側になる場合もあり得ることがわかった。また、この加速現象の場合にも、(3)で示した解析モデルは適用可能である。

おわりに、本研究を進めるにあたり、多くの有益な御討論、御助言を賜った東京大学 金沢 武教授、飯田 國廣教授をはじめ、日本造船学会溶接研究委員会第1分科会の各委員の方々に深く謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) R.P. Wei, T.T. Shih: Delay in Fatigue Crack Growth, Int. J. Frac., Vol. 10, No. 1, March 1974, p. 77.
- 2) D.M. Corbly, P.F. Packman: On the Influence of Single and Multiple Peak Overloads on Fatigue Crack Propagation in 7075-T 6511 Aluminum, Eng. Fract. Mech., Vol. 5, 1973 p. 479.
- 3) J. Schijve: Observations on the Prediction of Fatigue Crack Growth Propagation Under Variable-Amplitude Loading, ASTM STP 595, May 1976, p. 3.
- 4) O.E. Wheeler: J. Basic Eng., Trans. ASME, Series D, Vol. 94, No. 1, March 1972, p. 181.
- 5) J.D. Willenborg, R.M. Engle and H.A. Wood: A Crack Growth Retardation Model Using an Effective Stress Concept, AFFDL-TM-FBR-71-1, Air Force Flight Dynamics Laboratory, 1971.
- 6) W. Elber: In Damage Tolerance in Aircraft Structure, ASTM STP 486, 1971, p. 230.
- 7) J.C. Newman, Jr.: A Finite-Element Analysis of Fatigue Crack Closure, ASTM STP 590, 1976, p. 281.
- 8) 小倉, 大路, 大久保, 芝野: 変動応力下の疲労き裂伝播に関する解析的研究, 日本機械学会論文集, Vol. 42, No. 358, June 1976, p. 1615
- 9) E.F.J. von Euw, R.W. Hertzberg and R. Roberts: Delay Effects in Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 513, 1972, p. 230.