極低き裂伝播速度領域における 疲労き裂伝播則について

—RPG 規準による疲労き裂伝播挙動の研究 (第3報)—

正員 豊 貞 雅 宏* 正員 丹 羽 敏 男*
正員 山 口 喜久次* 正員 武 中 秀 樹**
荒 巻 直 樹*** 真 崎 宏 明***

Fatigue crack propagation law for wide range from very slow crack growth rate region to stable crack propagation rate region

—Study of fatigue crack propagation behavior based upon RPG load (3rd report)—

by Masahiro Toyosada, *Member* Toshio Niwa, *Member*
Kikuji Yamaguchi, *Member* Hideki Takenaka, *Member*
Naoki Aramaki Hiroaki Masaki

Summary

In the first report¹⁾, we proposed a fatigue crack propagation parameter ΔK_{RP} from the view point of the appearance of cyclic tensile plastic zone at a crack tip in replace of ΔK_{eff} based upon the crack opening load. Moreover the automatic measuring system was developed for the purpose of obtaining the re-tensile plastic zone's generated load (RPG load) as well as crack opening load and crack closing load during fatigue crack propagation.

In this report, fatigue crack propagation tests of CT specimens were carried out with various stress ratios of constant amplitude loadings. Moreover ΔK_{th} tests with the conditions of constant stress ratio and constant maximum load with increasing stepwise minimum load were also carried out.

These tests were conducted by using above developed system. It becomes clear that ΔK_{RP} gives the quantitative effect of stress ratio on fatigue crack growth rate and the relation of logarithmic ΔK_{RP} and logarithmic crack propagation rate appears to be linear in the wide range from very slow crack growth rate region to stable crack growth region.

On the other hand, threshold phenomenon appears only circumstantially due to the particular loading pattern on ΔK_{eff} based on the crack opening load and ΔK_{eff}^c based on the crack closing load.

1. 緒 言

疲労き裂は自身の高応力/ひずみ集中による引張塑性変形領域を進むため、き裂内面に大きな残留引張変形層を形成し、高応力比の状態や過大荷重直後を除けば最小荷重時にはき裂閉口(塑性誘起き裂閉口)が生じる。この現象は、

Elber¹⁾により発見され、弾性学的に応力の特異性が出現するき裂閉口荷重以上の荷重振幅に対応する応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} (有効応力拡大係数範囲)を Paris 則²⁾中の ΔK に置き換えた伝播則が最も疲労き裂伝播挙動を定量的に表現し得ると一般には考えられている。疲労き裂閉口現象は、塑性誘起き裂閉口ばかりでなく、き裂内に酸化物が堆積し、実際にき裂が閉じる以前に酸化物とき裂縁が当たり力学的にき裂が閉口する状態となる酸化物誘起き裂閉口³⁾や粗い破面の接触によって起こる破面粗さ誘起き裂閉口⁴⁾が考えられており、このため解析的にき裂閉口荷重を求めることが困難とされている。

荷重振幅を漸減していくと低 ΔK_{eff} 領域では stage II の領域における ΔK_{eff} と伝播速度 da/dN との関係から予測

* 九州大学工学部

** 三菱重工業(株)長崎造船所(研究当時 九州大学大学院工学研究科)

*** 九州大学大学院工学研究科

されるき裂伝播速度よりも小さくなる現象が長いき裂に対して認められ、 ΔK_{eff} とき裂伝播速度の両対数グラフ上で直線とならずいわゆる sigmoidal な形状を有していることが明らかとされ、ある ΔK_{eff} より低い領域で見掛けき裂は停留するという結果となり、この ΔK_{eff} の閾値を $(\Delta K_{eff})_{th}$ とし、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ は材料定数とみなすのが一般的取扱いになっている。

一方西谷ら⁹⁾は、除荷過程でき裂が閉口する荷重は負荷過程でき裂が開口する荷重と異なることを、菊川ら⁶⁾が開発した除荷弾性コンプライアンス計測回路を改良して高倍率とした回路を用いて明らかにし、き裂開口荷重にかわりき裂閉口荷重を用いて有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} を定義すれば、低 ΔK_{eff} 領域でも ΔK_{eff} とき裂伝播速度の両対数上で stage II の延長線上にき裂伝播速度のものを示した。しかし彼らは ΔK_{th} 付近でのき裂閉口荷重を微小コンプライアンス変化の詳細な考察をしないで決定しており、彼らが示したコンプライアンス変化曲線からみると最大荷重時には開口しているにもかかわらず閉口しているとみなしたために生じた結論と理解される。

ところで著者ら⁷⁾は、1 サイクル中における微小コンプライアンス変化をき裂開閉口および弾塑性挙動と結びつけて考察し、負荷過程において引張塑性域がき裂先端に生じだす時点の荷重 (RPG 荷重) 以上における荷重振幅に対応する応力拡大係数範囲 ΔK_{RP} がき裂伝播速度を律するパラメータであり、この ΔK_{RP} により ΔK_{th} 現象を定性的に説明できることを示した。さらに RPG 荷重を計測するための自動高精度コンプライアンス計測試験システムを開発し、RPG 荷重の決定法について明らかにした^{8),9)}。

そこで本報では、CT 試験片を用いて応力比を種々変化させた一定荷重振幅下の疲労き裂伝播試験、応力比を一定に保ちながらき裂の成長に合わせて漸次荷重振幅を低減させていく ΔK_{th} 試験、および最大荷重を一定に保ちながら最小荷重をき裂の成長に合わせて上昇させていく ΔK_{th} 試験を、開発した高精度微小コンプライアンス計測試験システムを用いて実施し、応力比がき裂伝播速度に与える影響を ΔK_{RP} で定量化できることを示すと同時に低 ΔK_{RP} 側でも stage II と同じ疲労き裂伝播則が成立することを示す。

2. 供試材および実験方法

実験に供した鋼材は Table 1 に示す SM-41 B であり、本鋼材より Fig. 1 に示す CT 試験片を作成し、620°C、2 hr 保持の条件で熱処理を施した。Fig. 2 に応力比 0.05 の条件で ΔK_{th} 試験を実施し ΔK が約 $9.7 \text{ MPa} \sqrt{m}$ の時点で現れた引算回路を通した後のひずみ ϵ_{SUB} と荷重の関係の計測例を示す。Fig. 2 は ϵ_{SUB} を非常に高倍率としているのでかなりのノイズが認められるが、最大荷重付近で負荷とともにコンプライアンスが小さくなり、嘴に似たコンプライアンス変化が認められた。この嘴は治具のピン部を軽く木

製ハンマでたたくと一時的に消滅することが明らかとなり、ピン部での回転が自由でないことから生じた現象であることが判明した。そこでピン受け部を回転しやすいように ISO の K_{IC} 試験原案¹⁰⁾ で推奨されている直線部を有する楕円状に加工し、焼き入れをピン部と受け部に施すなど改良を試みたがほとんど変化しなかった。そこでピン受け部にボールベアリングを配置したところ Fig. 3 に示すように嘴が最大荷重付近で消失した。そこでそれまでに実施した試験は全て invalid と判断し、改めてボールベアリン

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SM-41B steel used

Chemical composition (%)					Mechanical Properties		
C	Si	Mn	P	S	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)
0.15	0.21	0.58	0.019	0.012	323	451	29

Fig. 1 CT specimen used

Fig. 2 Load~subtracted strain hysteresis curve of a CT specimen by using the jig recommended in ISO

グを配置した治具を用いて実験を実施することにした。しかしさらに低 ΔK となると、この治具を用いても少し嘴状の現象がみられ、完全にこの現象を取り除くことは不可能であった。

試験に先だち、き裂長さ ω と除荷弾性コンプライアンスとの関係を一定荷重振幅を与えて調査した。試験片のき裂前方の自由端（背面）にゲージを貼付し、背面ゲージ出力をパーソナルコンピュータに取り込むと同時にビーチマークを導入した。破断後のビーチマークから表裏面および $t/4$, $t/2$, $3t/4$ (t : 板厚) の位置における 5 点のき裂長さを計測し、その平均値と除荷弾性コンプライアンスの関係をあらかじめ求めた。その結果を Fig. 4 に示す。本関係をパーソナルコンピュータに入力することによりき裂長さを常に認識させ、負荷の制御を行った。

RPG 荷重, き裂開口荷重およびき裂閉口荷重の決定法については前報^{8),9)} に示したとおりである。まず応力比 0.05, 0.3, 0.5 の 3 種の一定荷重振幅下における疲労き裂伝播試験を行った。つぎに以下に示す要領で応力比を 0.05 の一定条件下で、荷重振幅を漸次減少させていく ΔK_{th} 試験 (2 体実験を行った), 最大荷重を一定に保ち最小荷重を漸次増加させて、荷重振幅を減少させていく ΔK_{th} 試験を実施した。

ΔK_{th} 試験では、以下に示す ASTM-E 647 で推奨されている負荷を与えることにした。すなわち、

- (1) K 値減少率は平均的な意味で $k = \frac{dK/da}{K} \geq -0.08 \text{ mm}^{-1}$ とする。
- (2) 荷重を段階的に減少させる場合の 1 回の荷重減少量は、最大荷重の 10% を越えてはならない。また次の荷重減少までの間に 0.5 mm 以上き裂が進展していなければならない。
- (3) da/dN を評価する際の Δa は、0.25 mm 以上あること。ただし ΔK_{th} 付近では Δa は精度の 10 倍以上あればよい。

Fig. 3 Load~subtracted strain hysteresis curve of a CT specimen by using the jig with ball-bearings

さらに前歴の影響をできるだけ小さくする意味から、最大荷重を低下させる実験では前段階で形成された最大荷重時の塑性域寸法 ω を、無限板中のき裂に対する次式

$$\omega = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_{\max}}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (1)$$

ただし、 $K_{\max}$: 最大荷重時の応力拡大係数 (本論文では Srawley¹¹⁾ による CT 試験片の K 値を採用した。)

σ_Y : 完全面振り試験で得られた降伏点⁹⁾ (174 MPa)

で推定し、 $\omega > 0.5 \text{ mm}$ となった場合は ω だけき裂を進ませてから、次ステップに移行させるようにした。また最大荷重を一定に保った実験では 1 回の荷重振幅の減少量は前段階の荷重振幅の 10% とし、他は上記の推奨に従った。

なお上記の試験は、島津製作所から借用した 5 ton 油圧サーボ疲労試験機を用い、一定荷重振幅試験は 15 Hz で、 ΔK_{th} 試験は 10 Hz の繰返し速度下で行った。 ΔK_{th} 試験ではほぼ 4000 万サイクル負荷しており、一体で約 1.5 ヶ月の実験期間を要した。

3. 実験結果および考察

一定荷重振幅試験の引算回路からの出力 ε_{SUB} と荷重の関係より前報^{8),9)} の手法により RPG 荷重, き裂開口荷重およびき裂閉口荷重を決定し、き裂長さとの関係を求めた。Fig. 5~Fig. 7 に応力比 0.05, 0.3, 0.5 のそれぞれにつき、計測された最大荷重, 最小荷重もあわせて示す。すべての応力比の下で、初期切欠 ($a = 30 \text{ mm}$) からき裂発生とともに RPG 荷重, き裂開口荷重およびき裂閉口荷重は上昇し、あるき裂長さで最大値を示した後徐々に減少する傾向が認められる。切欠先端の幅が大きく切欠底に曲率を有する場

Fig. 4 Relationship between compliance and crack length obtained by beach mark test

Fig. 5 Measured RPG, crack opening and crack closing loads plotted against measured crack length for constant amplitude loading test with the stress ratio of 0.05

Fig. 6 Measured RPG, crack opening and crack closing loads plotted against measured crack length for constant amplitude loading test with the stress ratio of 0.3

Fig. 7 Measured RPG, crack opening and crack closing loads plotted against measured crack length for constant amplitude loading test with the stress ratio of 0.5

Fig. 8 Relationship between crack propagation rate and stress intensity factor range for constant amplitude loadings with various stress ratios by using CT specimens

合には RPG 荷重は最初大きく、き裂の成長につれて急激に減少し極小値を示した後上昇して最大値を示していた⁹⁾が、初期切欠幅が 0.2 mm とシャープな切欠では高応力集中となり小さな荷重で降伏が起こるため RPG 荷重が一旦減少する現象が生じなくなったものと理解できる。また 3 者の関係は実験を行った応力比の範囲内では、RPG 荷重 > き裂閉口荷重 > き裂開口荷重という関係が認められる。

次に、Fig. 8 には計測された任意時期のき裂長さとも最大荷重、最小荷重の関係より求めた ΔK と da/dN の関係を示す。これまで報告されている多くの報告に比べて応力比のき裂伝播速度依存性は非常に少なく、応力比が大きくなってもわずかにき裂伝播速度が速くなっているのみである。この現象については、付録で考察する。なお、 ΔK_{RP} 、 ΔK_{eff} および ΔK_{th} による整理結果については ΔK_{th} 試験の結果と合わせて後に論じる。

Fig. 9 には応力比を 0.05 と一定にして荷重を漸次減少していく ΔK_{th} 試験において計測された RPG 荷重、き裂開口荷重およびき裂閉口荷重の計測結果例をき裂長さとの関係で示す。同図には与えた最大荷重、最小荷重の計測結果も同時に示した。応力比が 0.05 のため最小荷重はほぼ一定に保持されているようにみえるが漸次徐々に低下している。き裂発生直後の RPG 荷重、き裂開口荷重およびき裂閉口荷重の変化挙動は一定荷重振幅試験において計測された

Fig. 9 Measured results of P_{RPG} , P_{op} and P_{cl} for ΔK_{th} testing with constant stress ratio of 0.05

Fig. 10 Measured crack growth curve for ΔK_{th} testing with constant stress ratio of 0.05

Fig. 5～Fig. 7 と同じである。最大荷重を減少させた次ステップの最初の時期で RPG 荷重，き裂開口荷重およびき裂閉口荷重とも一旦上昇し，極大値を示した後徐々にき裂の成長とともに減少していく傾向が認められ，上昇の程度は荷重振幅が小さくなるほど大きくなることわかる。応力比を一定としているものの 0.05 であり，ほぼ最小荷重が一定に保持されているので，この現象は付録 Fig. A の case A の挙動が表れたものと理解できる。そして最終ステップでは急激に RPG 荷重，き裂開口荷重およびき裂閉口荷重が上昇している。

Fig. 10 は Fig. 9 の試験片でのサイクル数とき裂長さの関係の計測結果を示したものである。次ステップにはいった直後からき裂伝播速度が一旦減少する傾向が認められ，特に最終ステップではほとんどき裂が伝播しないような結果が生じており，RPG 荷重，き裂開口荷重およびき裂閉口荷重の変化挙動と対応してき裂の成長曲線に変化が生じているものと考えられる。

Fig. 11 には最大荷重を一定とし，最小荷重を漸次上昇させた場合の RPG 荷重，き裂開口荷重およびき裂閉口荷重とき裂長さの関係についての計測結果例を示す。き裂発生直後，本図では Fig. 9 と比べて RPG 荷重，き裂開口荷重およびき裂閉口荷重が急激に上昇しているが，その原因は今

Fig. 11 Measured results of P_{RPG} , P_{op} and P_{cl} for ΔK_{th} testing with increased stepwise minimum loading and keeping maximum loading

Fig. 12 Measured crack growth curve for ΔK_{th} testing with increased stepwise minimum loading and keeping maximum loading

のところ不明である。初期を除くと，次ステップに進んだ直後から RPG 荷重，き裂開口荷重およびき裂閉口荷重はデータにばらつきはあるものの全体的にみれば，徐々に増加していく傾向が認められる。これは，付録 Fig. A の case D に対応するものと考えられる。さらに重要な挙動は，最終ステップにおいて RPG 荷重は最大荷重に漸近していく傾向にあるが，き裂開口荷重，き裂閉口荷重は最小荷重に漸近していくという非常に異なった挙動を示していることである。最小荷重を漸次上昇していく試験では，最小荷重においてもき裂が開く傾向にあり，そのためき裂開口荷重，き裂閉口荷重は最小荷重に漸近していくが，荷重振幅が小さくなると最終的には弾性状態しか生じないため，RPG 荷重は最大荷重に漸近していくものと解釈される。

Fig. 12 には Fig. 11 の試験片のき裂成長曲線の計測結果を示す。応力比一定とした ΔK_{th} 試験における Fig. 10 と比較すると成長曲線は全体的になめらかであることがわかる。これは付録 Fig. A の case D の結果からもわかるように RPG 荷重，き裂開口荷重（あるいはき裂閉口荷重）の変

Fig. 13 Relationship between crack propagation rate and effective stress intensity factor range based upon the crack opening load

Fig. 15 Relationship between crack propagation rate and effective stress intensity factor range based upon the RPG load

Fig. 14 Relationship between crack propagation rate and effective stress intensity factor range based upon the crack closing load

化が次ステップの定常値に単調に徐々に漸近していくためであると理解される。

そこで以上の結果をもとにき裂開口荷重、き裂閉口荷重およびRPG荷重を規準とする各有効応力拡大係数範囲

ΔK_{eff} , ΔK_{eff}^{cl} および ΔK_{RP} とき裂伝播速度の関係を調査した。それらの結果を Fig. 13～Fig. 15 に示す。これらの図には応力比 0.05, 0.3, 0.5 の一定荷重振幅試験、応力比 0.05 で行った ΔK_{th} 試験 (2 体) および最大荷重を一定に保持して最小荷重を漸次上昇させた ΔK_{th} 試験の結果を全て示してある。

き裂開口荷重より求めた ΔK_{eff} による Fig. 13 およびき裂閉口荷重により求めた ΔK_{eff}^{cl} による Fig. 14 の両者ともほぼ一本の線上にき裂伝播速度がのっているが、両者を比較するとき裂開口荷重による ΔK_{eff} の方がデータのまとまり具合が良いようにみれる。また両者の整理では両対数上の ΔK_{eff} , ΔK_{eff}^{cl} の小さな範囲で stage II の直線からはずれ有効応力拡大係数範囲に閾値が認められ、下限界があるようにみれる。この結果はこれまで行われてきた ΔK_{eff} による研究結果と全く同じ現象である。西谷らは ΔK_{eff}^{cl} で整理すると閾値が表れないと報告しているが、この結果は Fig. 11 の結果および考察より当然予測されるものである。

一方 RPG 荷重を規準とした ΔK_{RP} で整理した Fig. 15 を参照すると $da/dN \approx 10^{-11}$ (m/cycle) という極低き裂伝播速度領域から $da/dN \approx 10^{-6}$ (m/cycle) という広領域で $\log(\Delta K_{RP})$ と $\log(da/dN)$ は線形関係を有していることがわかる。そして応力比の影響も精度良く定量化されることがわかる。また ΔK_{eff} による Fig. 13, ΔK_{eff}^{cl} による Fig. 14 では ΔK_{th} 試験と一定荷重振幅試験のデータには詳細にみると stage II で勾配が異なっているようにみれるが、 ΔK_{RP} で整理した Fig. 15 では試験による有異差も認め

られない。 $\Delta K_{RP} < 0.7$ (MPa $\cdot$ m $^{1/2}$) というさらに低い ΔK_{RP} 領域で ΔK_{RP} には閾値が生じるのかもしれないが、この範囲の実験を行うためにはき裂長さの計測精度 (本システムでは約 0.05 mm) をさらに上げるか、もしくは長期間の実験 (少なくとも da/dN を 1 オーダ下げるには 10 倍の期間を必要とし、 $da/dN \approx 10^{-12}$ (m/cycle) のデータをとるとなると、一体で 2 年程度の連続実験が必要となる) が必要であり現実的には困難である。以上の結果より長いき裂に対しては

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K_{RP})^m \quad (2)$$

ただし、 C, m : 材料定数
が広 ΔK_{RP} 領域で成立することが明らかである。

ところで富田らは船体構造部材の疲労強度の面から実際の遭遇波浪の状態をシミュレートできる標準変動荷重モデル (嵐モデル)¹²⁾ を提案し、その嵐モデルに基づく変動荷重疲労試験¹³⁾ を実施している。彼らは中央貫通切欠付引張試験片 (供試材は本論文で実験したものと同じ規格材の SM-41 B 鋼である) を用いており、試験片幅 (W) 400 mm, 初期切欠長 ($2a$) 140 mm の試験片を用いて等級 B の嵐を繰り返し負荷された結果を、Fig. 15 で得られた (2) 式における C, m 値を使用して以下に解析することにした。実験はき裂長 ($2a$) が 160 mm まで終了しており $a/W \leq 0.4$ の範囲で実験されているので事実上無限板とみなせる。

Fig. 16 は 1 回の嵐 (等級 B) で伝播するき裂成長量と嵐の回数との関係を示したものである。図中には一様応力分布下での無限板にき裂が存在する場合の疲労き裂伝播シミュレーションプログラム¹⁴⁾ に伝播寿命を求める機能を付加したプログラムを用いて、1 回の嵐で伝播するき裂成長量を推定した結果を示す。実験およびシミュレーション結果とも 1 回の嵐で伝播するき裂成長量は嵐の回数が増えるほど小さく、嵐の回数が増えると一定値に収束していく傾向を示している。これは初期の嵐で形成される塑性域がかなり大きく、き裂がこの影響域を抜けるのにかなりの寿命を要しているものと考えられる。シミュレーション結果は実験結果よりも少し大きなき裂成長量を与えているもののほぼよい一致をみており、本シミュレーションの妥当性が確認された。

Fig. 17 には 5 回目の嵐が作用している間の K_{max} 値の変化およびき裂成長曲線の実験値とシミュレーション結果とを比較した結果を示す。図中には RPG 荷重時のシミュレーション値 (K_{RP}) も併せて示した。図より明らかなようにき裂成長曲線について実験値とシミュレーション結果は多少の差はあるもののよい一致をみている。さらに ΔK_{RP} が零となるところでき裂の停留が生じており実験結果とほぼ同じような傾向を示している。すなわち ΔK_{th} の存在を仮定しなくても ΔK_{RP} によるとき裂停留現象が説明できる。このことは ΔK_{th} は真の材料定数ではなく、過去の負荷履歴の影響で生じるもので適切なパラメータを採用していないために見掛け上表れる現象と解釈される。事実、菊川らは応力比 0 の条件下で切欠から初期き裂を伝播させる場合の K_{max} が大きいほど ΔK_{th} が大きくなる¹⁵⁾ ことを示している。また変動荷重下では、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ 以下でもき裂が実際に伝播している¹⁶⁾ ことを確認している。これらのことから ΔK_{th} 現象は過大荷重が作用した後に遅延減速現象が生じる挙動と同じで、超過大荷重が作用する場合はついに停留するという結果と本質的に同じ挙動である。

Fig. 16 は 1 回の嵐 (等級 B) で伝播するき裂成長量と嵐の回数との関係を示したものである。図中には一様応力分布下での無限板にき裂が存在する場合の疲労き裂伝播シミュレーションプログラム¹⁴⁾ に伝播寿命を求める機能を付加したプログラムを用いて、1 回の嵐で伝播するき裂成長量を推定した結果を示す。実験およびシミュレーション結果とも 1 回の嵐で伝播するき裂成長量は嵐の回数が増えるほど小さく、嵐の回数が増えると一定値に収束していく傾向を示している。これは初期の嵐で形成される塑性域がかなり大きく、き裂がこの影響域を抜けるのにかなりの寿命を要しているものと考えられる。シミュレーション結果は実験結果よりも少し大きなき裂成長量を与えているもののほぼよい一致をみており、本シミュレーションの妥当性が確認された。

4. 結 論

新しく提案している再引張降伏域発生荷重 (RPG 荷重)

Fig. 16 Relationship between number of storms and crack growth for one storm

Fig. 17 Comparison between experimental crack propagation curve and simulated one by using ΔK_{RP}

以上の負荷振幅に対応する応力拡大係数範囲 ΔK_{RP} の疲労き裂伝播速度に対する有効性を検討するため CT 試験片を用いて、応力比の異なる一定荷重振幅試験、応力比を一定にして負荷振幅を漸次減少させる ΔK_{th} 試験および最大荷重を一定にして最小荷重を漸次上昇させる ΔK_{th} 試験を行い、RPG 荷重、き裂開口荷重およびき裂閉口荷重を計測した。

得られた結果を要約すると以下の通りである。

(1) 最大荷重を低下させた直後には、RPG 荷重、き裂開口荷重およびき裂閉口荷重は一旦上昇し、き裂の成長とともに減少して一定振幅荷重下のそれらに近づいていく。

(2) 最大荷重を一定にして最小荷重を漸次上昇させると最終段階では、き裂開口荷重、き裂閉口荷重は最小荷重に漸近していくが、RPG 荷重は最大荷重に漸近する。この現象はき裂開口したまま弾性挙動を示すことと対応している。

(3) RPG 規準による ΔK_{RP} では、極低き裂伝播速度領域 (10^{-11} m/cycle のオーダー) から stage II の領域にわたりき裂伝播速度と ΔK_{RP} の関係は両対数上で直線となり、 ΔK_{RP} には閾値が認められない。

(4) き裂伝播速度に及ぼす応力比の影響を ΔK_{RP} 、き裂開口荷重による有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff} およびき裂閉口荷重による有効応力拡大係数範囲 ΔK_{eff}^{cl} のいずれでも定量化できている。

(5) ΔK_{eff} 、 ΔK_{eff}^{cl} では見掛け上き裂が停留するという ΔK_{th} 現象が表れている。しかしき裂停留現象は前歴の影響により生じるもので、 $(\Delta K_{eff})_{th}$ 、 $(\Delta K_{eff}^{cl})_{th}$ は材料定数ではない。

(6) ΔK_{th} 現象は、適切でないパラメータを採用することにより見掛け上表れるもので、過大荷重が作用した後の遅延減速現象と本質的には同じ挙動である。

以下付録より

(7) 油圧源の能力より繰返し速度を上げて実験すると、き裂の成長とともに増大する変位に荷重が追随しなくなり、最大荷重が徐々に低下する結果、疲労き裂伝播速度に及ぼす応力比の影響が表れにくくなる。

参 考 文 献

- 1) W. Elber: The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP-486 (1971) p. 230
- 2) P. C. Paris and F. Erdogan: A critical analysis of crack propagation laws, Trans. ASME J. Basic Eng., 85 (1963) p. 528
- 3) A. T. Stewart: The Influence of Environment and Stress Ratio on Fatigue Crack Growth at near Threshold Stress Intensities in Low-Alloy Steels, Engineering Fracture Mechanics Vol. 13 No. 3 (1980) p. 463
- 4) K. Minakawa and A. J. Mcevely: Scripta Meta, Vol. 15 (1981) p. 633
- 5) 西谷, 陳: 除荷弾性コンプライアンスに関する一考察, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 51, No. 465 (1985) p. 1436
- 6) 菊川, 城野, 田中, 高谷: 除荷弾性コンプライアンス法による低進展速度領域における疲労き裂進展速度とき裂開口挙動の測定, 材料学会論文集, Vol. 25 (1976) p. 899
- 7) 豊貞, 山口, 丹羽, 武中, 梶本, 矢島: 新疲労き裂伝播パラメータの提案と高精度コンプライアンス計測法の開発 —RPG 規準による疲労き裂伝播挙動の研究 (第 1 報)—, 日本造船学会論文集, vol. 169 (1991) p. 245
- 8) 豊貞, 丹羽, 山口, 武中, 荒巻: 疲労き裂伝播過程における 1 サイクル中の微小コンプライアンス変化の考察, 日本材料学会第 3 回機械・構造物の強度設計, 安全性評価に関するシンポジウム (1991) p. 12
- 9) 豊貞, 後川, 丹羽, 武中: 任意応力場における疲労き裂伝播シミュレーション —RPG 規準による疲労き裂伝播挙動の研究 (第 2 報)—, 西部造船会会報, vol. 83 (1992) p. 189
- 10) Sub-committee ISM/NFM/4/4 Toughness Testing: Draft British Standard Fracture Mechanics Toughness Test Part 1. Method for Determination of K_{IC} , Critical CTOD and Critical J Value of Metallic Materials, ISO/TC/64/SC4 N90, Document No. 91/37676 (1991)
- 11) J. E. Srawley: Wide Range Stress Intensity Factor Expressions for ASTM E399 Standard Fracture Toughness Specimens, Int. J. Frac. Mech., Vol. 12 (1976) p. 475
- 12) 富田, 河辺, 福岡, 田所: 波浪荷重の統計的性質と疲労強度評価のための波浪荷重のシミュレーション法 (その 1), 日本造船学会論文集, Vol. 170 (1991) p. 631
- 13) Y. Tomita and S. Tadokoro: The Effect of Time History of Variable Amplitude Loading Cycles on Fatigue Crack Growth Rate, ISOPE, Vol. 4 (1992) p. 282
および
富田: 嵐モデルに基づく変動荷重疲労試験 —疲労き裂伝播—, 日本造船研究協会第 216 部会資料, 資料 No. SR216 WG2-5-3 (1991)
- 14) 豊貞, 岡本, 藤原: き裂閉口を考慮した疲労き裂伝播モデル, 日本造船学会論文集, Vol. 152 (1983) p. 381
- 15) 菊川, 城野, 近藤: 疲労き裂進展下限条件試験法に対する検討 (き裂開口挙動に及ぼす荷重履歴の影響), 材料学会論文集, Vol. 30-330 (1981) p. 276
- 16) 菊川, 城野, 近藤: 低 K 領域における変動荷重下の疲労き裂進展挙動と進展速度の評価法, 日本機械学会論文集 (A 編), Vol. 47, No. 417 (1981) p. 468

付録 荷重変動にともなう RPG 荷重変化のシミュレーション結果

荷重振幅を変化させた場合、RPG 荷重がどのように変化するか的基础的挙動を把握する目的で、Fig. A(A)～(D)

Fig. A(A) The change of RPG stress and crack opening stress after maximum stress decreasing for a crack body in an infinitely wide plate subjected to cyclic uniform stress (case A)

Fig. A(C) The change of RPG stress and crack opening stress after minimum stress decreasing for a crack body in an infinitely wide plate subjected to cyclic uniform stress (case C)

Fig. A(B) The change of RPG stress and crack opening stress after maximum stress increasing for a crack body in an infinitely wide plate subjected to cyclic uniform stress (case B)

Fig. A(D) The change of RPG stress and crack opening stress after minimum stress increasing for a crack body in an infinitely wide plate subjected to cyclic uniform stress (case D)

に示すように一様応力分布下での無限板にき裂が存在する場合についてほぼ定常な疲労き裂となった後、最小応力を一定に保った状態で最大応力が低下する場合 (case A) と上昇する場合 (case B)、最大応力を一定に保った状態で最小応力が低下する場合 (case C) と上昇する場合 (case D) の4つのcaseについて、RPG 応力およびき裂開口応力の変化挙動を疲労き裂伝播シミュレーションプログラム¹⁴⁾を用いて調査した。この場合のRPG 応力およびき裂開口

応力の変化挙動は以下のように理解される。

a) case A: 最小応力を一定に保った状態で、最大応力が低下する場合

最大応力を低下させると、前ステップの定常状態においてき裂前方に生じた残留変形よりも小さな残留変形層をき裂先端内部に取り込むことになり、前ステップの場合よりもその部分で受け持つ応力は小さくなりそれだけ最小荷重時にはき裂閉口領域が増大することになる。そのためRPG

応力, き裂開口応力は増加していくが, 定常状態では RPG 応力, き裂開口応力は前ステップより小さくなるからあるところで最大値を示し徐々にき裂進展とともにこの定常状態に近づいていく。

b) case B: 最小応力を一定に保った状態で, 最大応力が上昇する場合

最大応力が大きくなった瞬間では, wake zone には前段階における小応力振幅による次ステップの定常状態における wake zone の残留変形より小さな残留変形層しか形成されておらずあたかも自然き裂に近い状態となり, 除荷時には開口しやすくなるため RPG 応力, き裂開口応力が一旦低下する。き裂伝播にともない大きな応力によって生じた大きな変形層をき裂内部に取り込むことになり, き裂閉口が生じやすくなるため RPG 応力, き裂開口応力が増加し, 次ステップにおける定常状態に近づいていく。定常状態では最大応力が大きくなるほど最小応力時のき裂開口領域が大きくなるので, RPG 応力, き裂開口応力は大きくなる。

c) case C: 最大応力を一定に保ち, 最小応力が低下する場合

最大応力を一定に保っているから, 前ステップとほぼ同じ残留変形を最小応力が低下した後に取り込むことになる。したがって大きな変化をとまわず, き裂の成長とともに RPG 応力, き裂開口応力は徐々に減少し次ステップの定常状態に漸近していく。

Fig. B Ratio of measured stress intensity factor range (ΔK) to the intended one (ΔK_0) with the crack propagation for constant amplitude loadings

d) case D: 最大応力を一定に保ち, 最小応力が上昇する場合

case C と同じであるが, 定常状態では RPG 応力, き裂開口応力が前ステップよりも大きくなるため, き裂成長とともに上昇し, 定常状態に漸近していく。

そこで Fig. 5~Fig. 7 を参照すると, 荷重振幅を一定とする実験を意図したにもかかわらず最大荷重はき裂の進展とともに減少し, 最小荷重は増大していく結果を示している。これは用いた疲労試験機が小油圧源にもかかわらず高サイクルの 15 Hz で実験を行ったため, き裂伝播とともに変位量が増大し油圧源の能力を超えた状態で使用した結果である。

そこで意図した最大荷重, 最小荷重が試験開始から試験終了時点まで常に一定に保持されている場合の $K_{\max}$ 値および ΔK 値と, 実験で与えた $K_{\max}$ 値および ΔK 値の比を Fig. 5~Fig. 7 よりき裂長さの関係で求めた。その結果を Fig. B, Fig. C に示す。両図を参照すると, 実際に与えられた $K_{\max}$ 値および ΔK 値と意図したそれらの比は応力比が異なってもほぼ同じ値でき裂の成長とともに減少している。そして $K_{\max}$ 値よりも ΔK 値の方が意図したものよりも低くなるのは, 上述の case D の現象と同様のものとなり, この場合は RPG 荷重が次ステップの定常状態で徐々に増加していくことから, 次ステップの定常状態に比べて有効応力が大きくなるため加速現象が表れる。しかし case A のような急激な RPG 荷重の変化は生じないから, 加速効

Fig. C Ratio of measured maximum K value ($K_{\max}$) to the intended one ($K_{\max 0}$) with the crack propagation for constant amplitude loadings

果は微小であると考えられる。しかるに $K_{\max}$ 値が減少するのは case A の現象と同様のものとなり、RPG 荷重は最大荷重を減少した直後急激に増大する。したがって本実験ではこの減速効果が大きく影響していると考えられる。

本実験では急激な最大荷重の変化はないが徐々に低下しており、case A の現象が連続的に生じていると解釈される。この場合荷重振幅が小さくなるほど、有効荷重振幅(=最大荷重-RPG 荷重)と外荷重振幅(=最大荷重-最小荷

重)の比が大きくなる。したがって $K_{\max}$ 値が意図したものより減少する場合、応力比が大きくなるほど減速効果が大きくなる。その結果として Fig. 8 に示すように、応力比が変化しても da/dN が同一な ΔK 値に対しあまり変わらない結果を与えているものと理解できる。上記の結果より 15 Hz で試験を実施すると試験機能力の関係から意図した荷重を与え得ないことが判明し、これが疲労き裂伝播挙動に影響を与えると考察される。