残留応力場における疲労き裂伝播挙動

--RPG 規準による疲労き裂伝播挙動の研究(第7報)--

正員 豊 貞 雅 宏* 正員 丹 羽 敏 男*

Fatigue Crack Propagation Behavior in the Field of Residual Stress Distribution —Study of Fatigue Crack Propagation Behavior based upon RPG Load (7th Report)—

by Masahiro Toyosada, Member Toshio Niwa, Member

Summary

In the previous paper, a simulation model of fatigue crack opening and closing phenomena in an arbitrary stress distribution field for the purpose of obtaining RPG load is shown.

From the calculation and experimental results of RPG load, the effects of stress ratio and delayed reterdation on fatigue crack propagation are quantitatively assessed. Moreover it becomes clear that the stopping condition of fatigue crack propagation is $\Delta K_{RP} \leq 0$.

In this paper, fatigue crack propagation tests in residual stress distribution field are carried out. Two types of center notched specimens are prepared : one is that gas heating is made at the center line of the specimen which leads to tensile residual stress field in the middle part of the specimen, the other at near the edges of the specimen which leads to compressive residual stress field in the middle part of the specimen. It becomes clear that tensile residual stress descends RPG load and compressive residual stress raises RPG load. Moreover if the large compressive residual stress exists, crack closes even when tensile yield zone generates at the crack tip under loading process. In this case, plastic zone could not grow until crack becomes fully open.

Simulated RPG load is in good agreement with experimental one even in the field of residual stress distribution. And compressive residual stress has a large effect of decreasing the fatigue crack propagation rate. These effects can be successfully estimated by the simulation model.

1. 緒 言

前報において,引張塑性域が出現し出す荷重すなわち RPG 荷重以上の荷重範囲が疲労き裂伝播に有効な荷重範 囲であり,それに対応する応力拡大係数範囲 *ΔK_{RP}* と疲労 き裂伝播速度との関係は下限界領域近傍も含めて両対数グ ラフ上で直線関係,すなわち

 $da/dN = C(\Delta K_{RP})^m$ (1) が成立することを示した¹⁾。また,長いき裂に対するき裂停 留条件は $\Delta K_{RP} \leq 0$ であることを明らかにした²⁾。さらに,任

* 九州大学工学部

原稿受理 平成7年7月7日 秋季講演会において講演 平成7年11月16,17日 意応力分布下における Dugdale モデルを基礎とし, 仮想き 裂部の変位連続条件を満たし, 新たにき裂面ができること により仮想き裂面に作用していた降伏点レベルの内圧の一 部が解放されることにより生じる塑性的な変位収縮を考慮 したき裂開閉ロモデルを提唱し³, このモデルを用いるこ とにより疲労き裂伝播速度におよぼす応力比の影響ならび に遅延減速現象が定量的に推定できることが判明した²。 しかしながら,上記は残留応力が存在しない場合について 確認されたものである。

そこで、本報では残留応力が存在しても同じ結果が得ら れるか否かを調査するとともに、RPG 荷重のシミュレーシ ョンが残留応力場でも成立するのか否かを調査した。引張 残留応力はき裂伝播速度を加速し、圧縮残留応力は減速す る効果があるので、切欠先端に引張残留応力を付与する場 合と圧縮残留応力を付与する場合、さらには残留応力が存 506

日本造船学会論文集 第178号

在しない場合の3者について,同一荷重条件下で疲労き裂 伝播試験を実施し,き裂成長曲線で直接その効果を比較で きるように配慮した。

2. 試験片および実験方法

供試材は KA-32 鋼 (9 mm 材) であり,その化学成分な らびに機械的性質を Table 1 に示す。この供試材より Fig. 1 に示す中央貫通切欠試験片を作成した。試験機容量の関 係から 4 mm 厚に切削している。また,初期に残留応力が 存在しない状態での本鋼材の(1)式における C,m 値を求 めるため,試験片作成後 620°C×2.5 hr の残留応力除去焼 鈍 (PWHT) を行った。

この PWHT 材で広範囲の *ΔK*_{RP} における疲労き裂伝播 速度を得るため,最大荷重を一定に保持し,漸次き裂の進 展に合わせて最小荷重をブロック的に上昇させる試験を先 に開発した試験システムを用いて実施した。なお,本試験 に先だち,き裂長さの推定のため別途用意した同一試験片 を用いてビーチマーク試験を行い,き裂長さと除荷弾性コ ンプライアンスの関係を予め求めた。ただし,ゲージは切 欠線上,試験片端部から5mmの位置の計4箇所に貼付 し,表裏面のゲージを直列に結線してひずみ変化の感度を 上げるようにしている。また,本試験では切欠線上の表裏 にゲージを密に貼り, RPG 荷重を測定できるようにした。 次に残留応力場での疲労き裂伝播挙動を調べるため,上

 Table 1
 Chemical composition and mechanical properties of KA-32 steel used

	Chemical Composition (%)												
C	Si	Mn	Р	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Sol Al				
0.15	0.18	1.10	0.011	0.004	0.01	0.02	0.02	0.01	0.25				
	Mechanical Properties												
Yeild	Yeild Strength (MPa)			Tensile Strength (MPa)			Elongation (%)						
	406			507			24						



(unit : mm) Fig. 1 Configuration of CNT specimen used

Table 2 Heating condition for gas heating

	Flow Rate (<i>l/min</i>)	Torch Height (mm)	Speed Rate (<i>mm/s</i>)	Tip Nozzle No.	Heating Position
T-Specimen	8.0	12.3	7.5	#500	Center
C-Specimen	5.0	10.0	7.5	#225	4 mm from Edge

記の PWHT 試験片の中心線上(長手方向に)をガス加熱し て、切欠先端に引張の残留応力を付与することを意図した 試験片(T試験片)と、上記 PWHT 試験片の両端部から 4 mm 離れた位置を試験片長手方向に同時にガス加熱して 切欠先端に圧縮の残留応力を付与することを意図した試験 片(C試験片)を用意した。ガス加熱はアセチレンガスを用 い、加熱線直下の裏面の最高到達温度が 700°Cになるよう にガス流量、トーチ高さ、トーチ移動速度を設定した⁴⁰。そ のガス加熱条件を Table 2 に示す。なお比較のために PWHT 材の試験片(N試験片)も用意した。

これらの試験片には全く同じ荷重条件(最高荷重,最低 荷重,繰返し速度)の一定振幅荷重を与え,き裂成長曲線 を求めると同時に RPG 荷重も測定した。

なお別に用意した T 試験片と C 試験片の表裏に 2 軸ゲ ージを貼付し,その周りを鋸で解放して T 試験片と C 試験 片の残留応力分布を求めた。

3. 実験結果および考察

3.1 供試鋼材の C, m 値

Fig.1に示す中央貫通切欠試験片(PWHT 材)を用い て、最大荷重を一定に保持し、最小荷重をブロック的に漸 次上昇させる繰返し負荷(繰返し速度:10 Hz)を与え、広 い範囲の疲労き裂伝播速度を計測した。

Fig.2には得られたき裂成長曲線を示す。図中には最大 荷重および最小荷重の計測値も同時に示している。前報¹¹ の実験ではき裂成長曲線は滑らかであったが、1回で変化 させる荷重振幅を大きくした今回の試験では、荷重振幅を 変化させた時点でき裂成長曲線にナックル点が認められ る。

Fig. 3 には計測された RPG 荷重を示す。この試験ではき 裂が進展するとともに最小荷重を上昇させているので,き 裂が開口したまま弾性状態となる方向に負荷を与えている ので,前報¹¹ と同様, RPG 荷重は最大荷重に漸近していく 傾向が認められる。図中には先に開発した疲労き裂伝播解 析プログラム³¹ を用いて,本鋼材 (PWHT 材)の丸棒引張 試験で得た降伏点 339 MPa を用いて RPG 荷重をシミュ レーションした結果も合わせて示してある。ここで用いた KA-32 鋼は前報⁴¹ で用いた KA-36 TMCP 鋼とほとんど 変わらないと考え,塑性的収縮量を表す係数 α は 1.8 とし てシミュレーションしている。シミュレーション結果は計



Fig. 2 Crack growth curve for fatigue testing with increased stepwise minimum loading and keeping maximum loading



Fig. 3 The change of RPG load for fatigue testing with increased stepwise minimum loading and keeping maximum loading

測された RPG 荷重と良く一致している。

Fig. 4 には計測された RPG 荷重, き裂長さ,最大荷重, 荷重繰返し数を用いて得られた ΔK_{RP} と疲労き裂伝播速度 との関係を示す。高 ΔK_{RP} におけるデータがこの試験では 得られないので,図中には残留応力が存在しない試験片を 用いて一定荷重振幅で試験した後述の N 試験片で得た結 果も示してある。前報¹⁾ と同様,低き裂伝播速度領域も含 め、 ΔK_{RP} と疲労き裂伝播速度は両対数グラフ上で直線関 係が成立している。すなわち(1)式で疲労き裂伝播速度が 与えられ、材料定数の C, m 値(最小二乗法による) は本鋼



Fig. 4 Relationship between crack propagation rate and effective stress intensity factor range based upon RPG load without residual stress

材 (PWHT 材) では $C=2.145\times10^{-11}$ m=2.924 (2)

ただし、 AKRP と疲労き裂伝播速度は SI 単位

となっている。なお、Fig. 2 には上記 C, m 値と Fig. 3 に示 した RPG 荷重のシミュレーション結果を用いて、計算上 の初期き裂長を a=8.0 mm としてその後のき裂成長曲線 を推定した結果を細実線で示しており、実験値とほぼ一致 していることが解る。

3.2 疲労き裂伝播挙動におよぼす残留応力の影響

T 試験片および C 試験片のガス加熱時に試験片裏面に 取り付けた熱電対で温度-時間曲線を計測した結果,加熱線 直下の裏面における最高到達温度は力学的溶融点である 700°C程度に達していた。Fig.5-a)には T 試験片で計測し た切欠線上の試験片長手方向残留応力分布を示している。 切欠先端部では意図したように引張の残留応力が働いてい る。一方,Fig.5-b)は C 試験片で計測した残留応力分布で ある。C 試験片でも意図通り切欠先端部に圧縮の残留応力 が生じている。

PWHT 材の N 試験片, T 試験片および C 試験片のそれ ぞれに最大荷重 27.46 kN,最小荷重 1.37 kN の繰返し荷



Fig. 5 Residual stress distribution after gas heating



Fig. 6 Comparison between experimental crack growth curves and estimated ones

重を与えた。なお、繰返し速度は各試験とも 10 Hz とした。 得られたき裂成長曲線を Fig. 6 に示す。当然の事ながら寿 命は T 試験片が最も短く、ついで N 試験片、そして C 試験 片が最も長くなっている。

き裂発生寿命の定義は種々あるが、0.2~0.5 mm 程度の 可視き裂となるまでと定義するならば残留応力が小さくな るほどき裂発生寿命は長くなっている。一方、0.02~0.05 mm 程度の結晶粒オーダのき裂になるまでと定義するの であれば、残留応力はき裂発生にほとんど影響を与えてい ないようにみれる。T 試験片および N 試験片ではき裂が発 生すると加速度的にき裂が成長している。しかし切欠先端 部に圧縮の残留応力が働いている C 試験片ではき裂発生



Fig. 7 Comparison between measured RPG loads and estimated ones

直後一旦き裂の成長は速くなり、その後遅くなっており、 初期の残留応力が引張側に成り出す部分にき裂が達するよ りもかなり前に再びき裂の成長が速くなっている(Fig.5b)参照)。

Fig. 7 に RPG 荷重の計測結果を示す。N 試験片に比べ て、T 試験片では RPG 荷重は低くなっており、有効荷重振 幅が大きくなっている。これは引張残留応力の存在により き裂が開口しやすくなっていることと対応している。一方、 C 試験片では N 試験片よりも RPG 荷重は大きくなってお り、圧縮の残留応力の存在でき裂が閉口しやすくなってい ることと対応している。しかし、詳細にみればき裂発生直 後では RPG 荷重は N 試験片および T 試験片のそれとほ とんど同じであり、き裂の進展とともに RPG 荷重が一旦 上昇している。すなわち圧縮残留応力が存在してもき裂発 生直後の RPG 荷重レベルは N 試験片, T 試験片と同レベ ルであり、残留応力の存在はき裂発生時点(ミクロ的なき 裂の発生)では RPG 荷重に殆ど影響を与えていない。き裂 開口荷重が RPG 荷重に密接に影響を与えることを考慮す ると、この事は"き裂発生は剪断応力の繰返しで生じ、最 初の結晶粒内を進むミクロ的なき裂の場合にはき裂は開口 せずき裂が伝播し、き裂自身による応力の再配分は起こら ないが、き裂が最初の結晶粒界に達すると、前方の結晶方 位が最初の結晶のそれと異なるために、き裂の方向とは異 なるバーガスベクトルを有する刃状転位の増殖がき裂先端 に生じそれによりき裂が開口し始め、そのためにき裂自身 による応力の再配分が生じる"という考察⁵⁰を間接的に支 持しているものと思われる。

その後,き裂の前方で引き延ばされた材をき裂内に取り 込みながらき裂は伝播するため,圧縮の残留応力場ではき 裂閉口域が T 試験片や N 試験片よりも成長し,RPG 荷重 がき裂の成長とともに上昇するものと考えられる。しかし 負荷過程で塑性域が引張残留応力場に突入すると,最大荷 重時のき裂開口変位が大きくなるためき裂が除荷時に閉口 しにくくなり,RPG 荷重は減少していくという現象が C 試験片で生じているものと考察できる。

図中には、Fig.5 に示した残留応力分布の計測値(ただ し、切欠の左右の分布を平均化した)を用い、先に開発し た疲労き裂伝播解析プログラム³¹により、T 試験片および C 試験片の RPG 荷重を推定した結果も同時に示した。た だし、C 試験片では短い点線で示してある。さらに、残留応 力が存在しない N 試験片の RPG 荷重のシミュレーショ ン結果も示している。降伏点およびαは Fig.3のシミュレ ーションで用いた値と同じとしている。なお、T 試験片お よび C 試験片では、Fig.5 に示した切欠材の残留応力分布 を、疲労き裂伝播解析プログラムに入力しており、疲労き 裂伝播に伴う残留応力の再配分は本プログラムで考慮して いることになる⁶。

Fig.8にはC試験片のシミュレーションでき裂長が 6.02 mm となった時点の最大荷重,最小荷重,RPG 荷重, き裂開口荷重時におけるき裂開口変位,残留引張変形層の 厚さ(棒要素のゲージ長),作用応力分布を示す。圧縮残留 応力の存在によりa)図の最小荷重時には実き裂先端部の 極近傍はき裂が開口しているが,疲労き裂の大部分はき裂 が閉口している(実き裂内の作用応力が0の個所はき裂が 開口し,負の個所はき裂が閉口している)。またb)図に示 すように RPG 荷重時においてもき裂の内部でき裂が閉口 している。完全にき裂が開口する場合をき裂開口荷重と定 義すると,c)図のき裂開口荷重の方が RPG 荷重より高く なっている。き裂開口変位から残留引張変形層を引いたも のが,疲労き裂の実際のき裂開口変位と対応すると考えら れるが,d)図の最大荷重時ではき裂がかなり鈍化している ことが解る。

Fig. 8-c)をみるとき裂開口荷重時において引張塑性域 はほとんど成長していない。この場合, RPG 荷重からき裂 開口荷重にいたる間の荷重増分はき裂を開口させることに ほとんど費やされており,塑性域の成長には寄与していな いことが解る。したがって,き裂先端に引張塑性域が生じ 出してもき裂が閉口している場合には塑性域の成長はほと んど生じないので,このような状態ではき裂先端に塑性域 が生じる瞬間の荷重を RPG 荷重とするのは問題がある。 また,計測された RPG 荷重はコンプライアンスの変化か ら決定しているので,塑性域が成長する状態を規定してお り,この場合にはき裂が完全に開口する瞬間とほぼ一致す ると考えられる。

そこで、き裂先端に引張塑性域が生じてもき裂が完全に 開口していない場合には、き裂が完全に開口する瞬間をシ ミュレーションでは RPG 荷重とみなすことにした。この ように定義し直した RPG 荷重のシミュレーション結果を Fig. 7 中に実線で示す。き裂発生直後から板厚貫通き裂と して取り扱っているため初期は計測結果とシミュレーショ ン結果は一致していないが、ある程度き裂が成長した段階 からは RPG 荷重が良く推定できている。

すでに説明した Fig. 6 には Fig. 7 に示した RPG 荷重の シミュレーション結果と(2)式の C, m を使用して,(1) 式を用いて計算したき裂成長曲線の推定結果を示した。C 試験片ではき裂先端で塑性域が生じ出す時点の荷重(Fig. 7 中に示した点線)を用いた推定結果も合わせて示した。た だし計算上のき裂長さは a=6.5 mm としている。

T 試験片および N 試験片のき裂成長曲線の推定結果は 実験結果と非常に良く一致している。C 試験片では推定結 果は計測結果よりも多少短寿命側になっているが,これは Fig.7で RPG 荷重が計測値よりも多少低く推定されてい ることに対応している。推定したき裂成長曲線の変化挙動 は計測したそれと良く一致しており,残留応力分布の計測 精度を考えると,き裂成長曲線も定量的に良く推定できて いるものと考えられる。すなわち残留応力場でも RPG 荷 重は定量的に精度良くシミュレーションできていると判断 できる。

Fig. 9 には RPG 荷重の計測値より求めた ΔK_{RP} と疲労 き裂伝播速度との関係を示す。図中には Fig. 4 で得られた 関係を実線で示してある。N 試験片,T 試験片および C 試 験片での関係はばらつきはあるものの Fig. 4 の結果と良 く一致しており、3 者の間にも有意な差は認められない。以 上の結果より、残留応力の存在は開閉口挙動に影響を与え、 これにより RPG 荷重は変化するが(1)式の C,m 値には 影響をおよぼさないことが明らかとなった。



4. 結 論

RPG 荷重以上の荷重振幅に対応する応力拡大係数範囲 ΔK_{RP} が残留応力場においても疲労き裂伝播速度のパラメ ータとなり得るか否か,さらには RPG 荷重のシミュレー ションが残留応力場でも成立するのか否かを検討するた め、中央貫通切欠試験片を用いて、切欠先端に引張残留応 力を付与する場合と圧縮残留応力を付与する場合,さらに は残留応力が存在しない場合の3者について、同一荷重条 件下で疲労き裂伝播試験を実施した。得られた結果を要約 すれば以下のようである。

(1) 残留応力はき裂発生直後の RPG 荷重に影響をおよ ぼさないが,き裂の進展につれて引張残留応力は RPG 荷重を低下させ,圧縮残留応力は RPG 荷重を上昇さ せる。

- (2) 残留応力が存在しても(1)式は成立し,その C, m 値は残留応力の影響を受けない。
- (3) 最大荷重を一定に保持し、最小荷重を段階的に上昇 させる場合、残留応力分布が存在する場合のいずれに おいても、板厚貫通き裂に対しては疲労き裂伝播解析 プログラムを用いて RPG 荷重を定量的に推定でき る。ただし、き裂先端に引張塑性域が生じてもき裂閉 口域が存在する場合には、き裂が完全に開口する時点 を RPG 荷重とする取り扱いが必要である。
- (4) 引張残留応力はき裂伝播寿命を短寿命側に、圧縮残 留応力はき裂伝播寿命を長寿命側にする効果があり、 引張残留応力の加速効果よりも圧縮残留応力の減速効 果の方が見掛上大きい。

なお,本研究は日本造船研究協会第219部会(部会長: 町田進東京大学教授)の共同研究として実施したものであ



Fig. 9 Relationship between crack propagation rate and effective stress intensity factor range based upon RPG load

る。有益なご討論を頂いた委員諸氏に謝意を表します。

参考文献

- 豊貞, 丹羽, 山口他: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)-,日本造船学会論文集, 第172号(1992), p. 589
- 2) 豊貞, 丹羽, 山口:長いき裂に対する疲労き裂遅延 減速現象とき裂停留条件について-RPG 規準によ る疲労き裂伝播挙動の研究(第6報)-, 日本造船学 会論文集, 第176号(1994), p. 439
- 豊貞, 丹羽: RPG 荷重のシミュレーション-RPG 規準による疲労き裂伝播挙動の研究(第5報)-,日 本造船学会論文集,第176号(1994), p. 427
- 豊貞,山口:線状加熱による溶接構造物の疲労強度 向上対策の検討,日本造船学会論文集,第176号 (1994), p. 465
- 5) 豊貞, 丹羽: 切欠底から発生する微視・微小き裂の 疲労き裂寿命評価法について「発生と伝播の統一理 論による寿命予測のアルゴリズム」-RPG 規準によ る疲労き裂伝播挙動の研究(第4報)-, 日本造船学 会論文集, 第174号(1993), p. 589
- 向井,西村,金:引張残留応力場からき裂が伝播する場合の溶接残留応力場の再分布に関する研究,溶接学会論文集,Vol.4,No.1(1986), p. 154