疲労き裂の開閉口挙動に及ぼす溶接残留応力の影響に関する研究*

向井 喜彦**, 西村 新**, 金 應俊***

Effects of Welding Residual Stress on Fatigue Crack Opening Behavior*

by Yoshihiko Mukai**, Arata Nishimura** and Eung-Joon Kim***

Fatigue crack propagation tests were carried out on HT80 steel components on which residual stress fields were induced by electron beam welding, and the influence of residual stress on the fatigue crack opening behavior was investigated. An array of strain gauges attached along the section adjacent and parallel to the section including crack plane was used to examine the variation of stress distribution along the gauges attached section during uploading.

In case of notched status, the variation of stress distribution both in welded and unwelded components subjected tensile load showed same aspects regardless the distribution of residual stress. However, in case that fatigue crack propagated, the variation of stress distribution depended on the distribution of residual stress. Based on the above results, it is clarified that residual stress directly affects the fatigue crack opening behavior.

Key Words: Residual stress, Fatigue crack opening behavior, Tensile load, Electron beam welding, HT80 steel

1. 緒 言

従来より、疲労き裂伝播に及ぼす残留応力の影響に関する研究は、主に残留応力の大きさに注目して検討を行ったものが多く、これらの研究結果はき裂伝播に影響する残留応力の効果を初期残留応力分布から求めた応力拡大係数によって定量的に評価することの可能性を示している¹⁻⁵⁾。しかしながら、これらの研究に用いられている解析モデルには、き裂の開閉口挙動に影響を及ぼすと考えられる初期残留応力の分布形状が考慮されていないため、解析の適用範囲は引張残留応力場からき裂が伝播する場合、あるいは圧縮残留応力場のみをき裂が伝播する場合のように限定されており、解析の対象となる残留応力の分布もごく単純なものに限られている。

一方、残留応力の分布形状が疲労き裂伝播挙動、特にき裂の開閉口挙動に及ぼす影響については現在なお不明な点が多く、疲労き裂伝播に影響する残留応力の効果の定量的評価に、こういった残留応力分布形状に起因するき裂の開閉口挙動を考慮するまでには至っていない。

そこで本研究では、疲労き裂伝播に影響する残留応力の効果を定量的に扱うための初段階の研究として、圧縮・引張残留応力場さらにそれらの遷移領域を伝播する疲労き裂を対象とし、残留応力の分布形状がき裂の開閉口挙動に及ぼす影響について実験的に検討する。

2. 供試材および実験方法

実験に用いた試験片は、前報^{6,7)}において疲労き裂伝播に伴う残留応力の再分布挙動を検討する際供した一連の試験片であり、それに新たに母材の試験片を加えた。

供試材の化学組成ならびに機械的性質、電子ビーム溶接の溶接条件、試験片形状および各試験片の試験片番号は前報^{6,7)}に示したとおりである。

実験はまず、試験片の板幅の中央に設けた初期切欠の延長線と平行でかつ 6 mm 離れた試験片表面(前報^{6,7)}に示した歪ゲージ貼付位置の Section B)上に連続的に貼付したゲージ長 1 mm の 2 軸および 3 軸の歪ゲージを用い、疲労き裂伝播実験中それぞれのき裂長さで最大荷重、平均荷重および最小荷重における Section B 上の応力分布を測定した。また、歪ゲージ出力から応力への換算には $E=205900 \text{ MPa}$, $\nu=0.33$ とした。次に Fig. 1 に示す試験片の片面には、初期切欠延長線と平行に 2 mm 離れた断面を中心としてゲージ長 1 mm の応力集中用歪ゲージ(1 軸 5 素子)を貼付するとともに試験片中央部にはクリップゲージを取り付け、各き裂長さにおける荷重負荷に伴う荷重・歪、荷重・COD のヒステリシス曲線を求めた。疲労き裂伝播実験の実験方法および残留応力の測定方法は前報⁶⁾に示したとおりである。Table 1 に母材試験片(T.P. No. 1 B)を含む各試験片

Fig. 1 Positions of strain gauges and clip gauges for measuring crack opening point

*原稿受付 昭和61年5月28日 昭和59年度秋季全国大会で発表

**正 員 大阪大学工学部 Member, Faculty of Engineering, Osaka University

***学 生 員 大阪大学大学院 Student Member, Graduate School, Osaka University

Table 1 Test conditions

	Max. Stress (MPa)	Stress ratio
T.P. No. 1B	60	0.055
T.P. No. 1T	61	0.053
T.P. No. 1C	205	0.043
T.P. No. 2C	202	0.043

の実験条件を示す。

3. 実験結果および考察

き裂が存在する部材に荷重が負荷された場合、き裂先端の塑性変形の影響が無視できるものとすれば、ある位置での応力は、荷重負荷に伴って生じるき裂の開閉口のようなき裂形状の変化が起らない限り、外荷重に対して線形的に変化する。ところが、荷重負荷に伴ってき裂形状に変化が生ずれば、ある位置での応力は荷重に対して非線形的に変化する。また、同一長さのき裂に対しても荷重負荷に伴う応力変化の程度は測定位置によって異なる。

る。これらのことをもとに、荷重負荷に伴うき裂周辺における応力変化を調べることによって溶接残留応力が疲労き裂の開閉口挙動に及ぼす影響について検討を行った。

Fig. 2 は、各試験片について、初期切欠を設けた状態で測定した Section B における荷重軸方向応力 (σ_p) の試験片板幅方向の分布の変化を示したものである。参考のため、その断面での初期切欠を設けた状態での残留応力の分布を同時に示す。初期切欠を設けた状態での荷重負荷に伴う応力分布の変化の様子は、いずれの試験片においても同様であり、この場合、荷重負荷による応力分布の変化には残留応力の影響が現れないことがわかる。この理由は次のように推察される。

残留応力場にすき間のある切欠を設けると、切欠先端にはその周辺に存在していた残留応力が集中する^{6,7)}。この状態で引張荷重を負荷させると、切欠先端に集中していた残留応力は切欠先端の曲率半径に依存する応力集

Fig. 2 Stress distributions subjected to tensile load on notched status (Section B)

中率によって、引張残留応力が集中していた場合はさらに引張応力が集中し、圧縮残留応力が集中していた場合は圧縮残留応力が解放される。したがって、上述のように残留応力および負荷荷重による切欠先端での塑性変形が無視できるほど小さいものとすれば、切欠先端での応力集中の程度は残留応力の有無と関係なくほぼ一定となる。

Fig. 3 は、T.P. No. 1 B および T.P. No. 1 T 試験片の場合、初期切欠から発生した疲労き裂がある長さまで伝播した状態での荷重に伴う Section B における応力分布の変化を示したものである。なお、T.P. No. 1 T の場合はその断面でのき裂伝播により再分布した残留応力分布をともに示した。母材の T.P. No. 1 B に比べ、引張残留応力場からき裂が伝播する T.P. No. 1 T の場合は、荷重が負荷されると最小荷重ですでにき裂先端付近に応力集中が生じており、このことから、引張残留応力

場から伝播する疲労き裂は、無負荷状態で開口しているものと考えられる。また、T.P. No. 1 B においても平均荷重ではき裂先端部に引張の応力集中が認められており、このようにき裂先端に応力集中が生じ始める荷重レベルが母材の場合におけるき裂先端の開口レベルであることがわかる。

Fig. 4 は、圧縮残留応力場に設けた初期切欠からき裂が発生した T.P. No. 1 C および T.P. No. 2 C 試験片の場合について、き裂先端が初期圧縮残留応力場にある時の荷重荷重に伴う Section B における応力分布の変化を示したものである。いずれの試験片の結果においても平均荷重までは初期切欠付近に生じていた応力集中が最大荷重になるとき裂先端に移動する傾向が見られる。このような傾向は、き裂周辺に存在する圧縮残留応力のため、疲労き裂が無負荷状態で完全に閉口していることに起因する。すなわち、ある荷重レベルまでは、き裂が

(a) T.P. No. 1B

(a) T.P. No. 1C

(b) T.P. No. 1T

(b) T.P. No. 2C

Fig. 3 Stress distributions subjected to tensile load on fatigue crack propagated status (Section B)

Fig. 4 Stress distributions subjected to tensile load on fatigue crack propagated status (Section B)

閉口したまま切欠先端に集中していた圧縮残留応力が解放されるが、それ以上の荷重になるとき裂は開口し、荷重負荷による応力集中がき裂先端に生じることである。なお、このように応力集中点がき裂先端部に移動する荷重レベルがき裂先端の開閉レベルである。

Fig. 5 は、T.P. No. 1C および T.P. No. 2C 試験片の場合について、左側き裂の先端が溶接ビード付近の初期引張残留応力場に侵入した後、荷重負荷に伴う Section B における応力分布の変化を調べた結果である。試験片の左側における応力分布の変化は、荷重が負荷されるときき裂先端および初期切欠付近に同時に引張応力の集中が生じるような様相を呈する。これは、無負荷状態でき裂先端に存在する引張残留応力および切欠底近傍に依然として存在する圧縮残留応力のため、き裂先端部でき裂が部分的に開口している（以後、この部分開口部を

残留開口部と呼ぶことにする）ことを示しており、この状態で荷重が負荷されるときき裂先端では引張応力の集中が、切欠底では圧縮残留応力の解放が同時に行われる。

Fig. 6(a) は、Fig. 5(b) の T.P. No. 2C 試験片の左側き裂が伝播を続け、き裂先端が溶接ビードの中心線を通じた直後、荷重負荷に伴うき裂の形状の変化を撮影したものである。なお、参考のため、そのき裂長さでの Section B における残留応力分布を Fig. 6(b) に示す。上述したように、無負荷状態で初期切欠付近のき裂面はその周辺に存在する圧縮残留応力のため完全に閉口しているが、き裂先端部からき裂先端後方にかけて存在する引張残留応力のため、き裂先端後方には残留開口部が生じていることがわかる。また、き裂が完全に開口した最小荷重以上の荷重レベルにおいても、残留開口部における開口量は切欠底付近に比べ大きい。

なお、この状態からき裂がもっと伝播すると、き裂面に沿って存在する引張残留応力場は次第に大きくなり、無負荷状態でもき裂は完全に開口するものと考えられる。

以上、残留応力場における荷重負荷に伴う疲労き裂の開閉挙動を、き裂面に近い試験片断面上における応力分布の変化より検討した。

次に、Fig. 1 に示したき裂付近の歪ゲージおよび試験片中央部のクリップゲージから求められた荷重・歪、荷重・COD のヒステリシス曲線によって、残留応力場における疲労き裂の開閉口挙動、特にき裂先端の開閉口挙動について検討を行う。

(a) T.P. No. 1C

(b) T.P. No. 2C

Fig. 5 Stress distributions subjected to tensile load on fatigue crack propagated status (Section B)

(a) Changes of crack opening feature for the crack shown in Fig. 6 (b)

(b) A crack located in residual stress field

Fig. 6 Changes of crack opening feature by increasing of tensile load (T.P. No. 2C)

Fig. 7 は、Fig. 1 に示した歪ゲージおよびクリップゲージから得られた荷重・歪、荷重・COD のヒステリシス曲線を測定時のき裂長さとともに示したものである。ここで、き裂長さは初期切欠長さを含んだ長さを表す。Fig. 7(a) は母材の T. P. No. 1 B の結果であるが、各歪ゲージからのヒステリシス曲線はいずれも下に凸の曲線から立ち上がり、その後直線的に変化する。また、このようにヒステリシス曲線に急激な変化が現われる荷重レベルはき裂先端に近づくほど高くなり、荷重負荷によるき裂の開口が切欠先端側からき裂先端側に向って行われることがわかる。また、クリップゲージからのヒステリシス曲線においても折れ曲がりから直線部に移行する位置の荷重レベルは各歪ゲージからのヒステリシス曲線の場合とはほぼ一致するが、き裂先端にもっとも近い位置の歪ゲージからのヒステリシス曲線ほど明確ではない。これらのことから、母材試験片の場合のき裂先端開口点の検出は、き裂先端すぐ後方の歪ゲージからのヒステリシス曲線によって正確に行われることがわかる。

Fig. 7(b) は、溶接部の引張残留応力場からき裂が伝播する T. P. No. 1 T の結果である。各歪ゲージおよびクリップゲージからのヒステリシス曲線がすべて直線的

に変化しており、この場合のき裂の開口は最小荷重以下ですすでに行われていることがわかる。

Fig. 7(c) は、T. P. No. 1 C の場合、き裂が試験片中央部の圧縮残留応力場を伝播する時の結果である。いずれの歪ゲージからのヒステリシス曲線も初期には直線的に変化するが、ある荷重レベルになると折れ曲がり、その後再び直線的に変化する。また、各ヒステリシス曲線において折れ曲がりが生じるまでの直線部の傾きは、初期切欠を入れることによって切欠先端に生じた圧縮残留応力の集中のため、き裂先端に近づくほど急激になっている。また、クリップゲージからのヒステリシス曲線においても折れ曲がりが生じる荷重レベルは歪ゲージからのヒステリシス曲線の場合とはほぼ一致しており、この場合のき裂先端の開口点は歪ゲージおよびクリップゲージのいずれのゲージからのヒステリシス曲線によってもほぼ正確に検出できることがわかる。

Fig. 7(d) は、試験片中央部の圧縮残留応力場から伝播した疲労き裂の先端が初期引張残留応力場に侵入し、き裂先端部に残留開口部が生じた T. P. No. 2 C の結果である。き裂先端部が無荷重状態ですでに開口しているため、き裂先端に近い位置の歪ゲージからのヒステリシ

(a) T. P. No. 1B

(c) T. P. No. 1C

(b) T. P. No. 1T

(d) T. P. No. 2C

Fig. 7 Load-strain and load-COD hysteresis curves from the different gauges and measuring points

ス曲線は最初から $P_{full\ op.}$ の荷重レベルの荷重範囲でほぼ直線的に変化する。これに対し、無負荷状態でき裂が閉口していた初期切欠付近のき裂面に近い位置の歪ゲージからのヒステリシス曲線はこの荷重範囲で下に凸の曲線的な変化をしている。これは、荷重負荷に伴うき裂の開口がき裂先端後方に向って行われることに起因しているものと考えられる。そしてクリップゲージを含むいずれのゲージからのヒステリシス曲線の場合も、 $P_{full\ op.}$ の荷重レベルになると折れ曲がり、その後直線的に変化する。したがって、この場合、折れ曲がりが生じる荷重レベルがき裂の完全開口レベルであることがわかる。

しかしながら、Fig. 7(c) および Fig. 7(d) の場合は、無負荷状態でき裂の形状が大きく異なるにもかかわらず、き裂先端にもっとも近い位置の歪ゲージからのヒステリシス曲線に現われた傾向はほぼ同様である。そこで、き裂先端が圧縮残留応力場から初期引張残留応力場に侵入するまでにおけるき裂の開閉口挙動を、き裂先端にもっとも近い位置の歪ゲージから得られた荷重・歪ヒステリシス曲線に基づいて検討する。

Fig. 8 は、T. P. No. 2 C の場合、圧縮残留応力場から伝播した疲労き裂の先端が初期引張残留応力場に侵入する前後の各き裂長さを対象とし、き裂先端にもっとも近い位置の歪ゲージから得られた荷重・歪ヒステリシス曲線を連続的に示したものである。Fig. 8(a) の Case 1 ~ 4 は、荷重・歪ヒステリシス曲線の測定を行った各き裂長さと測定に用いた歪ゲージの貼付位置を示したものであり、これらの各 Case における荷重・歪ヒステリシス曲線を Fig. 8(b) に示す。まず Case 1 のヒステリシス曲線は、最初からほぼ直線的に変化するが、 $P_{full\ op.}$ と示されている荷重レベルで折れ曲がり、その後再び直線的に変化する。これは、Case 1 の場合、き裂が試験片中央

部の圧縮残留応力分布のほぼ平坦な領域に存在するため、無負荷状態で完全に閉口していたき裂が $P_{full\ op.}$ の荷重レベル付近の非常に小さい荷重範囲で完全に開口することを示す。次に Case 2 のヒステリシス曲線は、最初直線的に変化するが、 $P_{tip\ op.}$ と示されている荷重レベル以後で下に凸の曲線的な変化をする。このような Case 2 のヒステリシス曲線の変化は次のように推察される。初期の直線部はき裂が完全に閉口している間の荷重負荷に伴う歪の変化であり、Case 1 のヒステリシス曲線に現われた初期の直線部と同様な傾向である。その後、ヒステリシス曲線が下に凸の曲線的な変化をするのは、き裂先端側に存在する圧縮残留応力がき裂先端後方に比べ小さいため、き裂先端が $P_{tip\ op.}$ で先に開口し、き裂が完全に開口するまでき裂の開口がき裂先端から後方に向って行われることに起因したものである。Case 3 は、き裂先端が初期引張残留応力場に侵入した状態を示す。この時のヒステリシス曲線は最初から下に凸の曲線から立ち上がる変化をしており、Case 2 のヒステリシス曲線に現われた初期の直線部が見られない。このことは、き裂先端が初期引張残留応力場に侵入することによってき裂先端が最小荷重以下ですでに開口しているためである。すなわち、Case 3 のヒステリシス曲線に現われた変化は Case 2 の $P_{tip\ op.}$ 以上の荷重レベルで現われたヒステリシス曲線の変化と同様である。Case 4 のヒステリシス曲線は Case 3 のヒステリシス曲線の初期の曲線部が現われなく、荷重負荷に伴うヒステリシス曲線の変化は最初からほぼ直線的な変化をする。これは、Case 4 のき裂長さでのき裂先端部における残留開口部は相当長くなっており、ヒステリシス曲線の測定に用いた歪ゲージの貼付位置では、き裂先端後方に向って行われるき裂の開口が検出できなくなるためである。

4. 結 言

溶接残留応力場を伝播する疲労き裂の荷重負荷に伴う開閉口挙動を、試験片のき裂進展線に近い表面に貼付した歪ゲージおよび試験片中央に取り付けたクリップゲージにより検討した。得られた結果を要約すると次のとおりである。

- (1) 溶接残留応力場に切欠のようにすき間のある人工き裂が存在する場合、荷重負荷に伴う切欠周辺の応力変化は残留応力の影響を受けない。
- (2) 疲労き裂が引張残留応力場に存在すると、き裂は無負荷状態で開口するため、引張荷重が負荷されると最初からき裂先端には引張の応力集中が生じる。
- (3) 疲労き裂が圧縮残留応力場を伝播する間は、無負荷状態でき裂が完全に閉口する。この状態で引張荷重が負荷されると切欠先端付近に集中していた圧縮残留応力が低減されることによってき裂は開口する。き裂が完全に開口した以後は、き裂先端で引張の応力集中が生じる。
- (4) 圧縮残留応力場から伝播した疲労き裂が引張残留応力場に侵入することによってき裂先端部に残留開口部が生じた場合は、引張荷重が負荷されるときき裂先端では引張応力が集中し、き裂先端後方では圧縮残留応力の解放が起る。

参 考 文 献

- 1) N. J. I. Adams; Crack Growth in the Vicinity of Welds, Weld. Res. Suppl., Nov., 1973, 508s-513s
- 2) G. Glinka; Effects of Residual Stress on Fatigue Crack

(a) Locations of fatigue crack and strain gauges for crack opening measuring

(b) Configuration change of hysteresis curves

Fig. 8 Configuration change of hysteresis curves according to crack propagation initially through compressive residual stress field

- Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Amplitude Loads, ASTM STP 677, 1979, 198-214
- 3) 本田和男, 島居太始之, 戸井詔彦, 元木克行; き裂材の疲労き裂進展に及ぼす残留応力場の影響, 材料, 第31巻, 第348号, (昭57-9), 908-914
- 4) 仁瓶寛太, 尾野英夫, 恒成利康; 溶接残留応力を考慮した疲労き裂伝播寿命の推定に関する研究, 日本造船学会論文集, 第152号, (昭57-11), 390-369
- 5) D. V. Nelson; Effects of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 776, 1982, 172-194
- 6) 向井喜彦, 西村新, 金広俊; 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, 第4巻第1号, (1986), 154-159
- 7) 向井喜彦, 西村新, 金広俊; 圧縮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, 第4巻第3号, (1986), 150-155

疲労亀裂開閉口に及ぼす応力比と応力拡大係数 範囲の影響について*

田中 洋一**, 征矢 勇夫**

Effects of Stress Ratio and Stress Intensity Factor Range on Fatigue Crack Closure in Steel Plate*

by Yoichi Tanaka** and Isao Soya**

The effective stress intensity factor range based on the measurements of crack opening loads gives the same crack propagation behavior for various stress ratios. Many authors have reported that the crack opening ratio U depends only on the stress ratio R . It is observed in experiment, however, that U depends also on stress intensity factor range ΔK .

In this study, fatigue crack propagation tests were carried out on a high strength steel with yield strength of 450 MPa class under various stress ratios. And a crack opening model, that contains the both effects of R and ΔK was investigated based on the cyclic elasto-plastic finite element analysis (FEA) and the fracture mechanics approach with the small scale yielding concept. The FEA can simulate well the plasticity-induced closure even under the plane strain condition. Generally, it is difficult to apply the FEA for oxide- and roughness- induced closures that play an important role in the near threshold region. On the other hand, in the small scale yielding model with the assumption of the existence of the residual deformation on the wake of a crack, the crack opening stress intensity factor can be calculated as the value at which the fatigue crack opening displacement becomes zero.

The resultant formula of U contains two parameters, one is for the plastic deformation at a crack tip and the other is for the oxide and the roughness in a fatigue crack. This model can explain successfully the experimental results. As a result, the fatigue crack propagation behavior under various stress ratios is described by the equation with five parameters which can be obtained with only one specimen. The predicted crack propagation rates showed good agreement with empirical results. Therefore, the formula derived in this study may be applied well to the evaluation of fatigue crack extension.

Key Words: Fatigue crack propagation, Stress intensity factor, Crack closure, Stress ratio, Fracture mechanics, Finite element analysis, High tensile strength steel, Residual deformation

1. 緒 言

構造物の使用される環境が厳しくなるにつれて, 厳密な安全性評価手法の確立が望まれている。一般に, 疲労亀裂伝播距離の比較的大きな溶接構造物では, 疲労寿命の大半は亀裂の伝播に費やされると言われており¹⁾, 溶接残留応力, 応力比など多くの影響因子を考慮して疲労亀裂の伝播挙動を正確に把握することは, 実用上重要である。そのため, 疲労亀裂伝播挙動について多くの研究例^{2,3)}があるが, その多くが Elber⁴⁾ により発見された亀裂開閉口の概念により理解可能である^{5,6)}。特に, 平均荷重が開閉口に及ぼす影響に対しては, 実用上の重要性から, 多くの研究者が開閉口荷重を予測する経験式を

提案しており, それらは開口比 U の応力比 R (=最小荷重/最大荷重) 依存性という形で示されている^{4,7)}。しかし, U は R のみならず応力拡大係数範囲 ΔK にも依存することが知られており, 亀裂伝播下限値 ΔK_{th} 付近では U は著しく低下する^{8,9)}。すなわち, ΔK_{th} まで有効な U の表示式を得ようとするれば, R , ΔK の両方の依存性を考慮しなければならない。

また, 溶接構造物における溶接残留応力が疲労亀裂伝播に及ぼす影響は, 一般に応力比の効果で説明される。このため, 本報告においては, 種々の応力比での疲労亀裂伝播実験と FEM 解析の結果をもとに, 小規模降伏モデルを用いた解析を行い, U に及ぼす R と ΔK の影響を調べ, U の一般表示式の検討を行った。

2. 供試材料と実験方法

疲労亀裂伝播試験に供した材料は板厚 16 mm の溶接

*原稿受付 昭和61年6月17日 昭和60年度秋季全国大会で発表

**正 員 新日本製鉄株式会社 Member, Nippon Steel Corp.