Fig. 7 Prediction of fatigue crack propagation behavior in weld residual stress field

伝播特性より求め、 $c = 1.53 \times 10^{-11} \left[\frac{m}{\text{cycle}(\text{MPa}\sqrt{m})^m} \right]$, $m = 2.73$ とした。従って、き裂成長曲線は次式で与えられる。

$$N = \int_{a_1}^{a_2} \frac{da}{c(\Delta K_{\text{act}})^m} \quad \dots\dots(6)$$

Fig. 7 は(6)式を数値積分した結果であるが、各溶接残留応力場でのき裂伝播挙動は ΔK_{act} を用いることにより完全開口時の c と m さえわかればすべて非常に良好な精度で推定し得ることが明らかとなった。

以上より、残留応力によるき裂の部分開口を考慮した ΔK_{act} の考え方を用いることにより溶接残留応力下における包括的なき裂伝播挙動の推定が可能となった。また、 ΔK_{act} 概念はいかえれば ΔK_{eff} 概念の拡張形であり今後、一般のより複雑な残留応力下における応力拡大係数への適用の可能性が窺われる。

4. 結 論

溶接残留応力下における疲労き裂伝播挙動を定量的に取り扱うためにき裂部分開口モデルを提案し、その K の算定法について重ね合せの方法の適用を試みた。得られた結果を次に示す。

- 1) き裂が初期残留応力分布引張圧縮遷移域に存在す

る場合、き裂は部分開口すると見なせる。

- 2) 部分開口き裂においてその閉口部がなめらかに閉口していると仮定すると重ね合せの方法により開口部の K が求められる。

- 3) 部分開口き裂の応力拡大係数振幅、 ΔK_{act} を用いることによって溶接残留応力下における応力拡大係数振幅はすべて表示できる。

- 4) ΔK_{act} を用いることにより溶接板中での疲労き裂伝播挙動の推定が可能となり、その実用性が明らかになった。

参 考 文 献

- 1) 福田収一、渡秀二、堀川浩浦；疲労き裂伝播におよぼす溶接残留応力の影響（き裂開閉口挙動に注目した実験的検討）、日本機械学会、Vol.47, No.416 (昭56-4), 384-390
- 2) 本田和男、他3名；き裂材の疲労き裂進展に及ぼす残留応力の影響、材料、Vol.31, No.348, 昭57.9, 908-914
- 3) G. Glinka; Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Amplitude loads, ASTM STP 677, 1979, 198-214
- 4) P. C. Paris and F. Erdogan; A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, Trans. of ASME, Journal of Basic Engineering, Series D, 85, No.3, 1963

圧縮残留応力場から伝播する疲労き裂の開閉口挙動に関する解析的検討*

向井 喜彦**, 西村 新**

Opening and Closure Analysis for Fatigue Crack Propagated from Compressive Residual Stress Field*

by Yoshihiko Mukai** and Arata Nishimura**

Initial residual stress due to welding was produced by thermo-elasto-plastic analysis based on F.E.M. calculation, thereafter cyclic-elasto-plastic analysis for fatigue crack propagation was carried out. A crack was propagated by 0.2 mm per one load cycle from compressive residual stress field to tensile stress field (stress ratio was 0.0). Crack opening and closing behavior was investigated in relation to re-distribution of residual stress and change of plastic region.

Main results obtained are summarized as follows:

1. When the crack tip was in the stationary compressive residual stress field, as crack planes were kept

*原稿受付 昭和61年9月10日 昭和59年度秋季全国大会で発表

**正 員 大阪大学 Member, Osaka University

in contact, the re-distribution of residual stress did not occur so much at unloading state. The crack opening was occurred at the crack root then moved to the crack tip, and this was also recognized in base metal analysis.

2. As the crack approached the initial tensile residual stress field, the residual stress re-distributed and the crack-opened-region remained near the crack tip even at unloading. The crack opening points were moved both to crack tip side and crack root side, and the crack tip opening occurred earlier than the full crack opening.

3. It was clarified that crack opening stress level would be able to be determined by strain gages glued just behind the crack tip, and using superposition model, the stress level could be estimated from the compressive residual stress distribution on the crack plane.

Key Words: Residual stress distribution, Fatigue crack, Crack opening stress, Thermal-elasto-plastic analysis, Cyclic-elasto-plastic analysis, F.E.M.

1. 緒 言

溶接残留応力は疲労き裂の発生・伝播に大きく関与するため、今日溶接構造物の性能評価にあたって、疲労き裂伝播に及ぼす溶接残留応力の影響を考慮することは避けられない課題となっている。

疲労き裂伝播はき裂先端およびき裂面上に存在する残留塑性歪などに起因したき裂開閉口挙動によって影響されることが知られており¹⁾、有効応力拡大係数の範囲による伝播速度の整理が数多く行なわれている。き裂開口点を解析的に求める試みが Newman²⁾、豊貞ら³⁾によってなされているが、溶接残留応力場といった内部応力場が存在する場での解析手法については必ずしも明らかでない。

そこで本研究では F.E.M. による熱弾塑性解析により

溶接残留応力場を再現し、さらに繰返し弾塑性解析を行ない溶接残留応力場でのき裂開閉口挙動について検討した。

初期引張残留応力場 (以下 ITRSF と記す) からき裂が伝播する時には、残留応力場が再分布しき裂先端に常に引張残留応力が集中するため、無負荷状態であっても⁴⁾、さらには、かなりの圧縮外応力が作用しても⁵⁾ き裂は閉口しにくくなる。しかしながら、初期圧縮残留応力場 (以下 ICRSF と記す) から伝播する場合には残留応力場がほとんど再分布せず、そのためき裂は閉口しにくくなる⁴⁾。また ICRSF から ITRSF へとき裂が伝播するとき裂面上に残存開口部が生じるといった複雑な開閉口挙動が観察される⁶⁾。こういった圧縮残留応力場のき裂開閉口挙動に及ぼす影響については充分明らかにされておらず、そのため ICRSF から伝播する疲労き裂を対象として解析的検討を行なうこととした。

2. 解析方法

2.1 熱弾塑性解析

溶接による残留応力を評価するためまず熱弾塑性解析を行なった。その流れ図を Fig. 1 に示す。熱伝導解析プログラムは水本、原のプログラム^{6,7)}を、熱弾塑性解析プログラムは上田等⁸⁾、寺崎⁹⁾の研究を参考にして作成した。

まず始めに熱伝導解析によって各節点の温度増分を求め、要素を構成する三節点の温度の平均値を各要素の温度とし各要素の温度増分を決定する。次に前段階での材料定数を用いて熱弾塑性解析を行ない、その温度増分に対する要素の歪増分、応力増分を求め、前段階での値に加算し現段階での応力・歪状態を決定する。この手順を定常温度状態 (全要素中の最高温度と最低温度の差が 20°C 以下) になるまで繰返し、初期残留応力場を求めた。なお、熱源となる節点に対しては強制加熱・冷却を行ない、一つの温度増分区間で全要素の温度増分の内最大となる温度増分が、加熱過程では 50°C 以下、冷却過程では 25°C 以下となるようにした。

一つの温度増分区間で弾性⇔塑性に遷移する要素の場合には Fig. 2 に示すように T_1 , T_p 間で弾性, T_p , T_2 間で塑性として取り扱う必要がある。そこで $\Delta T_M (=T_2 - T_1)$ の間で温度 (T) と相当応力 (σ_{eq}), 降伏応力 (σ_F) の間に線形関

Fig. 1 Flow chart of thermo-elasto-plastic analysis

Fig. 2 Definition of temperature division for an element to be yielded

係を仮定し、次式によって T_p 通過温度分割比 (r_p) を定義した。

$$r_p = \frac{\sigma_{eq,1} - \sigma_{Y1}}{(\sigma_{eq,1} - \sigma_{Y1}) - (\sigma_{eq,1} - \sigma_{Y2})} \quad \dots\dots(1)$$

また力学的溶融点 (T_M) を通過する要素に対しては、 ΔT_M の間を線形に分割する T_M 通過温度分割比 (r_M) を次式によって求めた。

$$r_M = (T_M - T_1) / (T_2 - T_1) \quad \dots\dots(2)$$

式(1), (2)から得られる r の最小のもの (r_{min}) を求め、 $r_{min} \cdot \Delta T_M$ だけ温度変化させ熱弾塑性解析を行ない、さらに残りの温度増分 $((1 - r_{min}) \cdot \Delta T_M)$ に対して順次 r_{min} を求め、各温度増分の和が ΔT_M と等しくなった時点で一つの温度増分区間内での熱弾塑性解析を終了することとした。

2.2 繰返し弾塑性解析

疲労き裂伝播に伴うき裂開閉口挙動を検討するため繰返し弾塑性解析を行なった。解析プログラムの基本構成は既報¹⁰⁾と同様であるが、本研究ではさらに次の2点について改良を加えている。

1) 繰返し負荷に伴うバウシinger効果を表現するため、浜田等の研究¹¹⁾に従い移動硬化則と等硬化則を混合して用いることとした。この混合割合を TRAS と記す。TRAS が0.0の時は等硬化則、1.0の時は移動硬化則となる。

2) 各繰返し負荷の負荷開始時に一節点ずつ節点の拘束をはずし、繰返しに伴ってき裂長さを順次増加させる。ただし拘束をなくした節点の反力が零となるまでは変位増分は生じないものとした。

熱弾塑性解析、繰返し弾塑性解析ともに平面応力状態とし、全体剛性マトリックスは共役傾斜法¹²⁾を用いて解いた。また溶接残留応力場での繰返し弾塑性解析では熱弾塑性解析結果をそのまま初期状態として用いた。

2.3 解析対象および解析条件

解析対象とした形状および要素分割を Fig. 3 に示す。このモデル (節点総数211, 要素総数354) は既報¹³⁾に示した ICRSF からき裂が伝播する HT 80 帯板試験片を想定した 1/4モデルである。溶接ビードに相当する熱源幅を 5 mm, 中央から熱源中心までを 30 mm とした。図中の●印は前述した強制加熱・冷却節点である。

熱弾塑性解析ではモデル周辺部を断熱し、力学的拘束を行っていない。また表面からの熱放散、潜熱を無視し、熱拡散率は温度に無関係に $0.001 \text{ m}^2/\text{sec}$ とした。降伏応力 (σ_Y), 加工硬化係数 (H'), ヤング率 (E), 線膨張係数 (α_1, α_2) の温度依存性を以下に示す。

$$\sigma_Y(T) = (1 - T/T_M) \times \sigma_{Y0} + H'_0 \times \epsilon_{eq}^p$$

$$H'(T) = (1 - T/T_M) \times H'_0$$

$$E(T) = 1.566 \times 10^{-4} \times T^3 - 4.116 \times 10^{-1} \times T^2 - 4.754 \times T + 1.998 \times 10^5$$

Fig. 3 Mesh division of F.E.M. calculation model

$$\alpha_1(T) = (0.4 \times T/T_M + 1.05) \times 10^{-5}$$

$$\alpha_2(T) = (0.25 \times T/T_M + 1.20) \times 10^{-5}$$

$$T_M = 830^\circ\text{C}, \sigma_{Y0} = 735.5 \text{ MPa}, H'_0 = 2206.6 \text{ MPa}, \nu = 0.33$$

ここで ϵ_{eq}^p は相当塑性歪, T_M は力学的溶融温度, ν はポアソン比であり, σ_{Y0}, H'_0 は 0°C での σ_Y, H' である。これらの値は上田等⁸⁾, F.C.Lea et al¹⁴⁾ の研究を参考にして決定した。

HT 80 は加熱・冷却過程で変態膨張を生じるが、これらの変態を考慮するため前記した2種類の線膨張係数 (α_1, α_2) を用いた。予備的に行なった均一加熱・均一冷

Fig. 4 Dilatometric curve

Table 1 Material constants and boundary conditions

Model code	$\sigma_{\max}$ (MPa)	$\sigma_{\min}$ (MPa)	σ_Y (MPa)	TRAS*	H' (MPa)
BM-A	83.4	0.0	764.9	0.5	2206.6
BM-B	83.4	0.0	568.8	0.5	2206.6
BM-C	83.4	0.0	764.9	0.0	2206.6
BM-D	83.4	0.0	764.9	1.0	2206.6
BM-E	83.4	0.0	764.9	0.5	4413.2
BM-F	137.3	0.0	764.9	0.5	2206.6
RS I	245.2	0.0	764.9	0.5	2206.6
RS II	335.9	0.0	764.9	0.5	2206.6

E=205947 MPa, $\nu=0.33$

*) TRAS: Ratio of kinematic hardening

TRAS=0.0 means full isotropic hardening model

却の結果を Fig. 4 に示す。図中に示す温度範囲で α , $\Delta\alpha$ の値を使いわけ変態を表現することとした。図中の実線は熱歪の定義に従って α を温度で積分した計算値(両端自由)で、F.E.M. による結果はそれらの値と良く一致している。なお、冷却過程での変態膨張は最高到達温度が 600℃ 以上となる節点を含む要素に対して生じさせた。

Fig. 3 に示したき裂伝播領域内で残留応力場が圧縮応力から引張応力に変化するように、平均温度上昇 (T_{av}) が 230℃, 380℃ の 2 種類の熱弾塑性解析を行なった。これらの結果をそれぞれ RS I, RS II と記す。また同一モデルを用いて残留応力のない場合 (以下母材 (BM) と記す) の繰返し弾塑性解析も行なった。繰返し弾塑性解析に用いた材料定数, 解析条件を Table 1 に示す。母材では最大応力 ($\sigma_{\max}$), σ_Y , TRAS, H' を変えたものについても解析を行なった。RS I, RS II での降伏応力は熱歪による降伏点の上昇を考慮して熱弾塑性解析時の値より少し大きな値を用いた。最大応力 ($\sigma_{\max}$) は初期き裂先端の 3 つの要素が降伏する外応力値とし (BM-F を除く), 最小応力 ($\sigma_{\min}$) をすべて零とした。Fig. 3 に示したように、き裂伝播領域の最小要素は底辺と高さが 0.2 mm の二等辺三角形であり、いずれの解析でも初期き裂長さを 18.9 mm とし 1 サイクル毎に 0.2 mm づつき裂を伝播させ 22.5 mm まで能析を行なった。また図中の○印の要素は後述する外力-歪曲線を求めた要素である。

3. 解析結果および考察

3.1 初期残留応力分布と残留応力の再分布

き裂断面上の要素の初期残留応力分布および節点反力から求めた初期残留応力分布を Fig. 5 に示す。節点反力からの換算は次式によって行なった。

$$\sigma_i = -P_i / (x_{i+1} - x_{i-1}) / 2 \quad \cdots (3)$$

ここで σ_i は節点 i での応力, P_i は節点 i の節点反力, x_{i+1} , x_{i-1} は節点 i の左右の節点 $i-1$, $i+1$ の x 座標である。RS I では T_{av} が低いため、RS II に比べて ITRSF が狭くなっている。き裂伝播領域を拡大して Fig. 6 に示す。要素の応力分布と節点反力から求めた分布はほぼ一致していることがわかる。本研究ではき裂面上の応力分布が重要な考察対象となるため以後節点反力から求めた応力分布を用いることとする。残留応力場き裂伝播領域に注目すると、RS I の解析はき裂が常に ICRSF (23.5 mm 以上が ITRSF となる) を伝播するものであり、RS II はき裂が ICRSF から ITRSF (20.7 mm 以上が ITRSF である) へ進展する解析である。

Fig. 5 Initial residual stress distribution by RS I and RS II (a) RS I (b) RS II **Fig. 6** Particular distribution on crack propagation region

BM-A, RS I, RS II のき裂伝播に伴うき裂伝播領域での残留応力の再分布を Fig. 7 に示す。BM-A ではき裂先端部に大きな圧縮残留応力が存在し、各サイクルでのき裂先端前方の応力分布が類似している。そしてき裂先端の移動とともに応力分布が相似的に平行移動する。RS I, RS II の結果でもき裂先端部に著しい圧縮応力が生じるが、き裂先端前方および後方の分布を見ると、き裂先端が安定した ICRSF にある間 (RS I の Cycle 1, 6) はほとんど場の変化が認められないのに対し、き裂先端が ITRSF に近づくと (RS I Cycle 18) 場が乱れはじめ、ITRSF にまで進行すると (RS II Cycle 12, 18) 場の乱れが大きくなる。

3.2 塑性域形状の変化

BM-A, BM-F, RS I, RS II のき裂伝播に伴う塑性域形状の変化を Fig. 8 に示す。BM-A ではき裂が伝播しても塑性域形状は全く変化しないが、外力を大きくした BM-F ではしだいに大きくなる。一方 RS I では塑性域は少しずつ大きくなるが、ITRSF に近づくと (22.5 mm) 急激に大きくなる。また RS II では初期にはき裂先端部で小さな塑性域しか形成されないが、(き裂先端前方の塑性域は熱弾塑性解析により求めた溶接熱による残留応力によって生じた熱源周辺の要素の塑性域である。) き裂先端が ITRSF に接近すると RS I と同様急に大きくなり、熱源周辺の塑性域と合体するとともにき裂先端近傍の要素が圧縮応力によって降伏する。そしてそれ以後はき裂先端前方に非常に大きな塑性域が存在するようになる。

Fig. 7 Change of residual stress distribution around crack tip according to crack propagation at minimum load (Upper; BM-A, Middle; RS I, Lower; RS II)

Fig. 8 Variation in plastic region according to crack propagation

以上のことから、き裂先端が ITRSF に近づくとき、ITRSF の影響を受けき裂先端前方に大きな塑性域が形成されるため、き裂面上の残留応力の再分布が生じ始めることがわかる。

3.3 き裂開閉挙動

BM-A, RS I, RS II のき裂開閉口の一例を Fig. 9, 10 に示す。BM-A では残留開口変位のない 18.9 mm から開口し始め、き裂先端に向かって開口する。そして除荷過程ではその逆にき裂先端から中央側に向かって閉口する。除荷状態での残留開口はき裂を 18.9 mm から伝播させたために生じたものである。RS I においてもき裂は 18.9 mm から開口し始め、き裂中央部が開口した後先端側に向う開口が起こる。除荷過程では先にき裂先端部が閉口し、その後開口した順とは逆に閉口し、最後に中央部が閉じる。いずれの場合もき裂伝播開始点付近の残留塑性歪のため、開閉口挙動が複雑になったが、き裂伝播領域に注目すれば、RS I においてもき裂先端側に向かって開口し、除荷過程ではその逆に閉口する。一方き裂先端が ITRSF に近づくとき、き裂先端近傍から開口し始め (Fig. 10, cycle 7 の $P/P_{\max}=0.56, 0.64$ でのき裂先端側の開口変位)、主としてき裂中央側に向かって開口する。さらに ITRSF にまでき裂が進展すると (Fig. 10, Cycle 19), 除荷状態で明らかな残存開口部がき裂先端付近に残留し、き裂先端が開口した後中央部が開口するようになる。またこの時、除荷過程では中央部が閉口した後き裂先端部が閉じる。この残存開口部は実験的にも認められており⁴⁾、ICRSF から ITRSF へ伝播する疲労き裂の一つの特徴と思われる。

現在のき裂先端から1つ手前の節点が開口する応力レベルを Tip op. (この時の応力を σ_{op} と記す)、その節点が閉口する応力レベルを Tip cl. (この時の応力を σ_{cl} と記す)、前サイクルでき裂先端から1つ手前であった節点が現サイクルで閉口する応力レベルを Tip on pre-stage op. とし、さらにき裂面全体が閉口する応力レベルを Full op. と呼ぶことにする。これらの応力レベルの

Fig. 9 Change of crack profile on crack opening and closing process (Left side; BM-A Cycle 19, Right side; RS I Cycle 13)

Fig. 10 Change of crack profile on crack opening and closing process of RS II (Left side; Cycle 7, Right side; Cycle 19)

繰返し負荷に伴う変化を Fig. 11 に示す。BM-A, RS I では前サイクルの Tip cl. と現サイクルの Tip on pre-stage op. が一致し、Tip op. は繰返し負荷に伴って上昇する傾向にある。これはき裂先端が閉口してから次に開口するまで弾性的な挙動を示すことを示しており、また残留応力の程度によって開口点が変わることを示している。一方、ITRSF にき裂先端が近づくと (RS II, Cycle 7 以降)、逆降伏のため現サイクルの Tip on pre-stage op. と前サイクルの Tip cl. が一致しなくなる。またき裂中央部が開口した後に先端部が開口し、中央部が閉口した後先端部が閉口するという挙動を示すため Tip op. と Tip cl. が大きくずれる。き裂先端が ITRSF に入ると Tip op. と Full op. のずれを生じ、Tip op. は単調に低下する。

これらの解析結果から(1)き裂面が接触することによって圧縮残留応力場が長期間に渡って保存されること、(2)内部応力場の平衡を保つために引張残留応力場も初期状態とはほぼ同じ位置に残存すること、(3)き裂が引張残留応力場に進展するときき裂先端部前方に局部的な引張残留応力の集中が起こり、除荷状態においてき裂開口させておくだけの効果を有していることがわかる。従来より圧縮残留応力場から伝播する疲労き裂の伝播速度を応力拡大係数範囲 (ΔK) に対して整理すると ICRSF から ITRSF に遷移する付近で伝播速度が急激に大きくなることが知られているが^{15,16)}、これは上述したき裂先端部の開閉口挙動の急激な変化によるものであろうと推測される。

3.4 き裂面近傍要素の外応力-歪曲線

実験的にき裂の開閉口挙動を求める際に、き裂面近傍に至るゲージを貼付し荷重-歪曲線を測定するが、ゲージ長の関係でゲージ中央部はき裂面から 1~2 mm 離れた位置となる。そこでき裂面から 1.2 mm 離れた断面上に要素重心のある要素の荷重-歪曲線およびき裂中央の節点の荷重-変位曲線について検討する。

Fig. 11 Variation in crack tip opening and closing stress level according to load cycles (Upper; BM-A, Middle; RS I, Lower; RS II)

Fig. 12 Hysteresis curves of load-strain of elements and load-displacement of node on loading process (Upper; BM-A Cycle 19, Lower; RS I Cycle 19)

Fig. 3 に○印で示した要素のうち、き裂先端後方に位置する要素および原点位置の節点 (NODE 1) の荷重過程での荷重軸 (Y) 方向歪、変位の変化を Fig. 12, 13 に示す。ここで M 157 の X 方向への要素重心は 22.0 mm であり、要素番号が若くなるにつれ 0.8 mm づつ重心位置が短くなる。BM-A の M 157 には Tip on pre-

Fig. 13 Hysteresis curves of load-strain of elements and load-displacement of node on loading process of RS II (Upper; Cycle 7, Lower; Cycle 19)

stage op. と Tip op. の間にかすかなおれまがりがある。

また RS I の M157 には Tip on pre-stage op. で明らかな屈曲点があり（この屈曲点までは主としてき裂面上の圧縮歪が解放される過程であり、それ以上では外力による歪集中のための変化である）、Tip op. ではそれほど明確ではない。実際の疲労き裂の伝播速度は極めて小さく、本解析での Tip on pre-stage op. とはほぼ一致しているものと考えられるため、実験的にはこの屈曲点を開口点と考えて良いと思われる。ICRSF から ITRSF にき裂が進展する時（Fig. 13）には、Tip op. と Tip on pre-stage op. の差が大きく、各位置で2つの屈曲点を生じる。残存開口部を持たない場合（Cycle 7）には初期に直線的（㊸）な変化を示し、その後わずかに下に凸（㊸）の曲線となる。（この間で局所的な開口が生じ圧縮残留歪が解放される。）そしてき裂後方が大きく開口すると、徐々に歪集中が生じ上に凸（㊸）の曲線となる。明らかな残存開口がある場合には（Cycle 19）初期の㊸部が狭くなり、㊸の領域が広がる。き裂がさらに伝播すると Tip on pre-stage op. は零となるものと考えられるため、この Tip on pre-stage op. が実験的な開口点に対応するものと思われる。

これらの歪変化はいずれの場合もき裂先端後方 0.5～1 mm の位置で最も大きく、き裂先端から離れるにつれて屈曲点が荷重の小さい側で生じるようになる。これは要素直下のき裂面が開口した時に屈曲が生じるためであり、歪ゲージの貼付位置とき裂先端の相対位置には十分な注意が必要である。なお上述した歪変化の傾向は既報⁴⁾の実験結果と良く対応しており、き裂面近傍での歪ゲージによる開閉口挙動の検討結果が妥当なものであることがわかる。

一方、NODE 1 の曲線を見ると、BM-A では Tip op. 付近に詳細に見ればわずかなおれまがりがあり、その他の場合には顕著な屈曲が認められる。また、いずれの場合も Tip op. 付近以下ではほぼ直線的な変化を示

す。すなわちき裂中央部での開口変位曲線には複雑な開閉口挙動の情報が表われにくいことがわかる。

3.5 き裂面上の残留応力分布と σ_{op}

一般に開口しているき裂が開口しようとする瞬間まではき裂周辺に何らの塑性変形も生じないと考えられるため、弾性問題として取り扱うことを試みる。

き裂先端部の開口および応力状態の模式図を Fig. 14 に示す。(a)は最小荷重の状態を示す、(b1)と(b2)を(a)に重ね合わせればき裂開口時の状態(c)となる。なお、(b1)、(b2)は塑性域を考慮した Dugdale-Barenblatt モデル¹⁷⁾を2つに分解したものに相当する。また図中の K_a , K_{b1} , K_{b2} , K_c は各状態での応力拡大係数である。ここで(a)、(c)ではき裂先端での特異場が存在しないため、 $K_{b1} + K_{b2} = 0$ でなければならない。すなわち、 K_{b1} と K_{b2} の絶対値は等しくなる。一般に実験で求まる K_{op} は K_{b2} であり、従って K_{b1} を求めれば K_{op} を知ることができる。

無限板中に長さ $2a$ のき裂があり、そのき裂面に上下対称な分布内圧 $\sigma_r(x)$ が作用する場合、 K 値は次式で与えられる¹⁸⁾。

$$K = \frac{1}{\sqrt{\pi a}} \int_{-a}^a \sigma_r(x) \sqrt{\frac{a+x}{a-x}} dx \quad \dots\dots(4)$$

解析結果より除荷時のき裂面の応力分布を Fig. 5 のように仮定し、き裂左右で対称とすれば式(4)は次式のような区分積分に置きかえられる。

$$K = \frac{2\sqrt{\pi a}}{\pi} \sum_{k=1}^{i-1} \sigma_k \left(\sin^{-1} \frac{a_{k+1}}{a_k} - \sin^{-1} \frac{a_k}{a} \right) \quad \dots\dots(5)$$

式(5)より求めた K 値を K_{res} とする。なお Tip op. 時にき裂面がまだ接触している場合には、接触部の応力分布を式(5)に代入し、得られた値の分だけ差し引いて K_{res} とした。このようにして求めた K_{res} は無限板を仮定しているため解析から得られる K_{op} とは端部効果の分だけ一致しないことが考えられる。そこで開口応力に注目することとした。 K_{res} を $\sqrt{\pi a}$ で除した値を σ_{res}° とし

Fig. 14 Elastic superposition model for crack opening

Fig. 15 Compressive residual stress distribution on crack plane

Fig. 16 Variation in $\sigma_{res}^{eq}/\sigma_{op}$ according to crack propagation

その値と解析から得られた σ_{op} との比とき裂長さの関係を Fig. 16 に示す。解析条件を変えた母材、残留応力場での結果いずれの場合も約 $\pm 5\%$ の範囲内で両者が一致していることがわかる。すなわち同一のき裂長さを有する無限板に圧縮残留応力場を代表するパラメータである K_{res} と等しい K 値を与える等価な応力がき裂開口応力となる。

4. 結 言

本研究で得られた主な結果を要約すると次のとおりである。

(1) き裂が初期圧縮残留応力場にある間は残留応力の再分布はほとんど生じない。しかし初期引張残留応力場にまで伝播すると明らかな再分布が起こる。これはき裂先端の塑性域が熱源周辺の塑性域と合体すること、および残存開口部を生じることによるためである。

(2) き裂が初期圧縮残留応力場にある間の開閉口挙動は母材でのそれと傾向的に一致する。しかしき裂が初期引張残留応力場に伝播するときき裂先端部に残存開口部を生じ、き裂先端が開いた後にき裂全体が開口し、き裂中央部が開いた後に先端部が開口するようになる。

(3) 母材をも含めてき裂面上の圧縮残留応力分布からき裂先端開口時の応力を求めることが可能である。特に

き裂が初期圧縮残留応力場にある場合は、(1)の前半の結論から初期残留応力分布を用いて良いものと考えられる。

(4) 圧縮残留応力場に伝播する疲労き裂の開閉口挙動を実測する場合には、き裂面に近く、き裂先端後方 0.5 ~ 1 mm の位置に歪ゲージを貼付しその外力-歪曲線を注意深く理解することによって測定できる。

最後に本研究を遂行するにあたり多大な御協力を頂いた当時大阪大学大学院生仲野修朗氏（現在(株)神戸製鋼所）に深く感謝します。また本研究の一部は昭和59年度科学研究費補助金（奨励研究A）によるものであることを記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) W. Elder ; The significance of fatigue crack closure, ASTM STP 486 (1971) p.230-242
- 2) J. C. Newman, Jr. ; Fatigue-crack propagation and closure under variable-amplitude loading, Proc. of US-Japan Cooperative Seminar (1981) p.169-178
- 3) 豊貞, 岡本, 藤原 ; き裂開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, 第152号 (1983) p.381-389
- 4) 向井, 西村, 金 ; 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, 溶接学会論文集, 第5巻, 第1号(1987) p.113-119
- 5) 太田, 小菅, 西島 ; 圧縮負荷を受ける溶接継手の疲れき裂伝ば挙動, 溶接学会全国大会講演概要, 第37集 (1985) p.337-337
- 6) 水本, 原 ; エンジニアリングサイエンスのための有限要素法理論編, 森北出版 (1983)
- 7) 水本, 原 ; エンジニアリングサイエンスのための有限要素法プログラム編, 森北出版 (1983)
- 8) 上田, 山川 ; 有限要素法による熱弾塑性挙動の解析, 溶接学会誌, 第42巻, 第6号 (1973) p.567-577
- 9) 寺崎 ; 構造用材料の溶接残留応力・溶接変形におよぼす溶接諸条件の影響に関する研究, 大阪大学学位論文 (1976)
- 10) 向井, 西村 ; き裂先端近傍の変形挙動に関する解析的検討, 溶接学会誌, 第51巻, 第10号 (1982) p.67-72
- 11) 浜田, 田中 ; バウシinger効果を考慮した円板の大たわみ弾塑性問題の一般解法, 日本機械学会論文集 (第1部), 巻305号 (昭47-1) p.37-47
- 12) 山田 ; 塑性・粘弾性, 日本鋼構造協会編, 培風館 (1972)
- 13) 向井, 西村, 金 ; 圧縮残留応力場からき裂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.3 (1986) p.150-155
- 14) F. C. Lea and O. H. Crowther ; The change of the modulus of elasticity and other properties of metals with temperature, Engineering, Vol.98 (1914) p.487-489
- 15) N. J. I Adams ; Crack growth in the vicinity of welds, Weld. Res. Sup., Vol.52, No.11 (1973) p.508 s-513 s
- 16) 向井, 西村, 金 ; 溶接残留応力場の再分布と疲労き裂の伝播挙動, 溶接学会疲労強度委員会資料, FS-658-84 (1984)
- 17) 石田 ; き裂の弾性解析と応力拡大係数, 培風館 (1976)
- 18) 岡村 ; 線形破壊力学入門, 培風館 (1976)